

EFEITO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DA AÇÃO SÍSMICA NA RESPOSTA ESTRUTU- RAL DE EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO

ANDRÉ ABBOTT BARREIROS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Xavier das Neves Romão

Coorientador: Engenheira Despoina Skoulidou

JUNHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha Família e Amigos

A curiosidade é mais importante do que o conhecimento.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Quero desde mais agradecer a todos os que apoiaram e me incentivaram para a realização deste trabalho, em especial:

Ao meu orientador, Professor Xavier Romão, pelas suas sugestões e críticas que me ajudaram a desenvolver um trabalho numa área ainda pouco conhecida, que se torna gratificante quando é feita uma nova descoberta.

À minha coorientadora, Despoina Skoulidou, que com a sua ajuda me facilitou o desenvolvimento do trabalho quando surgiam dúvidas.

À minha família pelo apoio e incentivo que me deram.

A todos os meus amigos, que não sendo da minha família foram como uma para mim nos tempos de desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é ver qual é o efeito que o ângulo de incidência do sismo tem na resposta estrutural em edifícios de betão armado.

O primeiro assunto abordado refere-se ao estudo do comportamento dinâmico em estruturas 3D, tanto para análises dinâmicas como estáticas.

De seguida serão tratados vários temas relativos a estudos anteriores de outros autores relativamente a temas muito semelhantes ao presente trabalho, mais especificamente sobre o ângulo de incidência crítico nas estruturas.

De modo a elaborar o estudo deste trabalho são mencionados quais os processos elaborados e que características das estruturas foram consideradas para a elaboração dos modelos 3D no programa computacional SAP2000 de onde foram extraídos os valores dos resultados para o qual será efetuado o estudo.

Posteriormente foram elaborados gráficos com a informação obtida no programa computacional SAP2000, de modo a prosseguir-se para a análise dos resultados, onde se pretende chegar a uma conclusão sobre o ângulo crítico de incidência da ação sísmica obtido em relação à tipologia da estrutura, tanto em planta como em altura.

PALAVRAS-CHAVE: estruturas de betão armado, análise dinâmica, análise estática, sismos, ângulo de incidência crítico do sismo.

ABSTRACT

The main objective of this study is to see what's the effect that the seismic angle of incidence has on the structural response of reinforced concrete buildings.

The first subject matter refers to the study of the dynamic behavior of 3D structures, both for static and dynamic analysis.

Then will be treated various topics relating to previous studies of other authors about similar themes to this work, more specifically on the critical angle of incidence on structures.

In order to do the study of this work, are mentioned which developed processes and characteristics of the structures were considered for the preparation of 3D models in computational software SAP2000 where the values were extracted from the results, for which will be made the study.

Subsequently graphics were prepared with the information obtained from the computational software SAP2000, in order to be pursued for the analysis of the results, where it purposes to reach a conclusion on the critical seismic angle of incidence obtained in relation to the type of structure, both in plan and height.

KEYWORDS: reinforced concrete structures, dynamic analysis, static analysis, earthquake, critical seismic angle of incidence.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE GERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XV
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS.....	XVII

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. CONTEXTO E IMPORTÂNCIA DO TEMA	1
1.2. OBJETIVOS.....	1
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2

2. ESTUDOS SOBRE O COMPORTAMENTO DINÂMICO DE ESTRUTURAS 3D 3

2.1. INTRODUÇÃO.....	3
2.2. ASPETOS GERAIS	4
2.2.1. SISMO	4
2.2.2. RESISTIR ÀS FORÇAS SÍSMICAS.....	7
2.2.3. EUROCÓDIGO 8	8
2.3. ANÁLISE ESTATICA	9
2.3.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS	9
2.3.2. ANÁLISE ELÁSTICA LINEAR	9
2.4. ANÁLISE DINÂMICA	11
2.4.1. INTRODUÇÃO	11
2.4.2. EQUILÍBRIO DINÂMICO	12
2.4. REGULARIDADE ESTRUTURAL	14
2.4.1. REGULARIDADE EM PLANTA	14
2.4.2. REGULARIDADE EM ALTURA	18

3. ÂNGULO CRÍTICO DE INCIDÊNCIA	25
3.1. INTRODUÇÃO	25
3.2. ÂNGULO CRÍTICO DE INCIDÊNCIA DO SISMO E A RESPOSTA ESTRUTURAL MÁXIMA	28
3.3. ORIENTAÇÃO CRÍTICA DE TRÊS DIREÇÕES SÍSMICAS CORRELACIONADAS	30
3.4. AVALIAÇÃO DA RESPOSTA CRÍTICA E DO ÂNGULO CRÍTICO DE INCIDÊNCIA COM O RSA E RHA	30
3.5. ESTUDO DO EFEITO DO ÂNGULO DE EXCITAÇÃO DO SISMO NAS FORÇAS INTERNAS DE ELEMENTOS DE EDIFÍCIOS METÁLICOS USANDO ANÁLISES NÃO LINEARES AO LONGO DO TEMPO	31
3.6. EFEITO DO ÂNGULO SÍSMICO DE INCIDÊNCIA NA RESPOSTA ESTRUTURAL SOB REGISTOS BIDIRECIONAIS E MOVIMENTOS DO SOLO ARTIFICIAIS.....	32
3.7. O EFEITO DO ÂNGULO SÍSMICO DE INCIDÊNCIA NA EXIGÊNCIA SÍSMICA DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO.....	32
3.8. ALGUNS PROBLEMAS RELACIONADOS COM A RESPOSTA NÃO ELÁSTICA DE EDIFÍCIOS SOB EXCITAÇÃO BIDIRECIONAL.....	34
3.9. INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DO SISMO NA RESPOSTA SÍSMICA DE PLANOS ASSIMÉTRICOS EM EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO	34
3.10. INVESTIGAÇÃO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA SÍSMICO CRÍTICO PARA ANÁLISES DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO.....	36
3.11. ASPETOS PRINCIPAIS	36
 4. CASOS DE ESTUDO ANALISADOS	 37
4.1. CONFIGURAÇÃO ESTRUTURAL.....	37
4.2. PARÂMETROS.....	38
4.3. MODELOS.....	43
 5. ANÁLISE DE RESULTADOS	 47
5.1. INTRODUÇÃO	47
5.2. ESTRUTURAS DE 1 ANDAR	47
5.2.1. ESTRUTURA DUPLAMENTE SIMÉTRICA COM RIGIDEZ IGUAL NAS DUAS DIREÇÕES	47
5.2.2. ESTRUTURA DUPLAMENTE SIMÉTRICA COM RIGIDEZ DIFERENTE NAS DUAS DIREÇÕES.....	50
5.2.3. ESTRUTURA SIMÉTRICA NUMA DIREÇÃO	53
5.2.4. ESTRUTURA ASSIMÉTRICA	56
5.3. ESTRUTURAS DE 5 ANDARES	58
5.3.1. ESTRUTURA DUPLAMENTE SIMÉTRICA COM RIGIDEZ IGUAL NAS DUAS DIREÇÕES	58

5.3.2. ESTRUTURA DUPLAMENTE SIMÉTRICA COM RIGIDEZ DIFERENTE NAS DUAS DIREÇÕES	61
5.3.3. ESTRUTURA SIMÉTRICA NUMA DIREÇÃO.....	64
5.3.4. ESTRUTURA ASSIMÉTRICA	68

6. CONCLUSÕES.....77

6.1. CONCLUSÕES.....	77
----------------------	----

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	78
-------------------------------------	----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
---------------------------------	----

ANEXOS.....82

ANEXO A – TABELAS DAS FORÇAS ESTÁTICAS PARA OS 3 PRIMEIROS MODOS DE VIBRAÇÃO	83
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Ilustração com a terminologia básica dos sismos [1]	4
Fig. 2.2 - Movimento do solo causado pelas ondas P e S [1].....	5
Fig. 2.3 - Exemplo de um acelerograma [1].....	5
Fig. 2.4 - Força de inércia aplicada no centro de massa da laje [1]	6
Fig. 2.5 - Espetro de resposta elástico [4]	7
Fig. 2.6 - Distribuição linear crescente ao longo da altura [3].....	11
Fig. 2.7 - Exemplo de Torção num piso [1].....	15
Fig. 2.8 - Edifício em L com problemas impostos no canto de reentrância [1]	16
Fig. 2.9 - Laje com um degrau [1].....	17
Fig. 2.10 - Dois exemplos de sistemas não paralelos [1]	18
Fig. 2.11 - Exemplos de andares frágeis [1]	19
Fig. 2.12 - Dois pilares de diferentes alturas sujeitos a força sísmica [1].....	20
Fig. 2.13 - Método de evitar um pilar curto numa encosta [1]	21
Fig. 2.14 - Descontinuidade parcial de uma parede [1].....	21
Fig. 2.15 - Diferentes configurações da torre e "pódio" [1]	23
Fig. 4.1 - Vista em planta da estrutura.....	37
Fig. 4.2 - Espetros de deslocamento	40
Fig. 4.3 - Espetros de deslocamento e Períodos estruturais.....	41
Fig. 4.4 - Espetros de aceleração.....	42
Fig. 4.5 - Espetros de aceleração e Períodos das estruturas.....	42
Fig. 4.6 - Exemplo modelo no programa SAP2000	44
Fig. 4.7 - Legenda dos elementos e nós das estruturas de um andar	45
Fig. 4.8 - Legenda dos elementos e nós das estruturas de cinco andares	45
Fig. 5.1 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 2 - 1 Andar i)	48
Fig. 5.2 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 2 - 1 Andar i)	48
Fig. 5.3 - Força Viga V_x (s/ carga vertical) - Elemento 2 - 1 Andar i)	49
Fig. 5.4 - Força Viga V_y (s/ carga vertical) - Elemento 2 - 1 Andar i)	49
Fig. 5.5 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 2 - 1 Andar ii).....	50
Fig. 5.6 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 2 - 1 Andar ii).....	51
Fig. 5.7 - Força Pilar V_x (s/ carga vertical) - Elemento 1 - 1 Andar ii)	52
Fig. 5.8 - Força Pilar V_y (s/ carga vertical) - Elemento 1 - 1 Andar ii)	52

Fig. 5.9 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 6 - 1 Andar iii)	53
Fig. 5.10 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 6 - 1 Andar iii)	54
Fig. 5.11 - Força Viga Vx (s/ carga vertical) - Elemento 5 - 1 Andar iii)	54
Fig. 5.12 - Força Pilar Vx (c/ carga vertical) - Elemento 3 - 1 Andar iii)	55
Fig. 5.13 - Força Pilar Vy (c/ carga vertical) - Elemento 3 - 1 Andar iii)	55
Fig. 5.14 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 6 - 1 Andar iv)	56
Fig. 5.15 - Força Pilar Vx (c/ carga vertical) - Elemento 3 - 1 Andar iv)	57
Fig. 5.16 - Força Pilar Vy (c/ carga vertical) - Elemento 3 - 1 Andar iv)	57
Fig. 5.17 - Legenda dos pilares	58
Fig. 5.18 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 20 (4º Andar) - 5 Andares i)	59
Fig. 5.19 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 20 (4º Andar) - 5 Andares i)	59
Fig. 5.20 - Força Pilar Vx (s/ carga vertical) - Elemento 20 (3º Andar) - 5 Andares i)	60
Fig. 5.21 - Força Pilar Vy (s/ carga vertical) - Elemento 20 (3º Andar) - 5 Andares i)	60
Fig. 5.22 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 11 (2º Andar) - 5 Andares ii)	61
Fig. 5.23 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 11 (2º Andar) - 5 Andares ii)	62
Fig. 5.24 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 26 (5º Andar) - 5 Andares ii)	62
Fig. 5.25 - Força Pilar Vx (c/ carga vertical) - Elemento 28 (4º Andar) - 5 Andares ii)	63
Fig. 5.26 - Força Pilar Vy (c/ carga vertical) - Elemento 28 (4º Andar) - 5 Andares ii)	63
Fig. 5.27 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 6 (1º Andar) - 5 Andares iii)	64
Fig. 5.28 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 17 (3º Andar) - 5 Andares iii)	65
Fig. 5.29 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 27 (5º Andar) - 5 Andares iii)	65
Fig. 5.30 - Força Pilar Vx (s/ carga vertical) - Elemento 20 (3º Andar) - 5 Andares iii)	66
Fig. 5.31 - Força Pilar Vx (c/ carga vertical) - Elemento 20 (3º Andar) - 5 Andares iii)	67
Fig. 5.32 - Força Pilar Vx (s/ carga vertical) - Elemento 25 (4º Andar) - 5 Andares iii)	67
Fig. 5.33 - Força Pilar Vx (c/ carga vertical) - Elemento 25 (4º Andar) - 5 Andares iii)	68
Fig. 5.34 - Eixos fictícios na estrutura assimétrica de 5 andares	69
Fig. 5.35 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 6 (1º Andar) - 5 Andares iv)	70
Fig. 5.36 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 4 (1º Andar) - 5 Andares iv)	70
Fig. 5.37 - Força Viga Vx (c/ carga vertical) - Elemento 37 (5º Andar) - 5 Andares iv)	71
Fig. 5.38 - Força Pilar Vx (c/ carga vertical) - Elemento 35 (5º Andar) - 5 Andares iv)	72
Fig. 5.39 - Força Pilar Vy (c/ carga vertical) - Elemento 35 (4º Andar) - 5 Andares iv)	72
Fig. 5.40 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 22 (4º Andar) - 5 Andares iv)	73
Fig. 5.41 - Força Viga Vx (s/ carga vertical) - Elemento 29 (4º Andar) - 5 Andares iv)	73

Fig. 5.42 - Força Viga V_x (s/ carga vertical) - Elemento 32 (4º Andar) - 5 Andares iv)	74
Fig. 5.43 - Força Pilar V_x (s/ carga vertical) - Elemento 27 (4º Andar) - 5 Andares iv)	74
Fig. 5.44 - Força Pilar V_y (s/ carga vertical) - Elemento 27 (4º Andar) - 5 Andares iv)	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Informação Zona Sísmica.....	39
Tabela 2 - Forças Estáticas Lineares - Estrutura de 1 Andar com configuração i)	39
Tabela 3 - Valores médios dos acelerogramas	43

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

F - força [kN]

m - massa [ton]

a – aceleração [m/s^2]

f – frequência [Hz]

w – frequência natural [rad/s]

T – período de vibração [s]

T_1 – período fundamental do edifício [s]

T_B – limite inferior do período no patamar de aceleração espectral constante [s]

T_C – limite superior do período no patamar de aceleração espectral constante [s]

T_D – valor que define no espectro o início do ramo de deslocamento constante [s]

γ_I - coeficiente de importância

$S_e(T)$ – espectro de resposta elástica horizontal

S – coeficiente de solo

a_g – valor de cálculo da aceleração à superfície de um terreno do tipo A

a_{gR} – valor de referência da aceleração máxima à superfície de um terreno do tipo A

η – coeficiente de correção do amortecimento

ξ – amortecimento viscoso (em percentagem)

F_i – força sísmica horizontal do piso i

F_b – força de corte na base

h – altura entre pisos

z_i, z_j – alturas das massas m_i e m_j acima do nível de aplicação da ação sísmica

m_i – massa do piso i

λ – fator de correção

A – matriz simétrica ‘N por N’

X – matriz deslocamentos ‘N por P’

B – matriz carregamentos ‘N por P’

M – matriz massa

C – matriz da viscosidade elástica

K – matriz de rigidez

$u(t)_a$ – deslocamentos nodais

$\dot{u}(t)_a$ – velocidade

$\ddot{u}(t)_a$ – aceleração

CR/CoR – centro de rigidez

CM/CoM – centro de massa

E – módulo de elasticidade [GPa]

ν – coeficiente de Poisson

V_x – esforço transversal no eixo X [kN]

V_y – esforço transversal no eixo Y [kN]

DEAD – elemento sujeito a carga vertical

EC8 – Eurocódigo 8

RQSQ – raiz quadrada da soma dos quadrados

CQC – combinação quadrática completa

Fig. – Figura

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO E IMPORTÂNCIA DO TEMA

Ao longo do tempo o ser humano tem vindo a evoluir na construção, tanto a nível de materiais utilizados como nos métodos de construção. A princípio começaram-se por utilizar materiais banais na natureza, tais como a pedra e madeira. Com a utilização destes materiais também, foram inicialmente, aplicados métodos de construção simples, não havendo grandes preocupações na estética e/ou segurança que a estrutura apresentasse. No entanto estes métodos e matérias foram sendo melhorados e daí surgiram novas técnicas de construção, como novos materiais de construção, tais como o betão armado.

Os métodos aplicados são constantemente repensados e melhorados, tendo em vista a obtenção de estruturas melhores, mais eficientes e mais seguras. Os métodos, que se utilizam hoje em dia, são fruto de muitos anos de investigação e esforço por parte dos engenheiros, apesar de por vezes estas situações sejam forçadas devidos a erros de construção ou cálculo obrigando os engenheiros a repensarem em outras soluções. Estes métodos estão pensados para que as estruturas venham a garantir segurança face a diversas ações que sejam prejudiciais para a estrutura, tais como o sismo, vento, neve, temperatura, etc. Apesar destes métodos já garantirem uma certa segurança face aos diversos problemas que podem surgir, ainda há muito para se aprender e melhorar, tendo em vista a obtenção de processos de dimensionamento que ofereçam maior segurança utilizando o menos de recursos possível e de maneira mais rápida e eficiente.

A engenharia não é como um livro, que se lê o livro e se aprende tudo o que existe, ela vai-se aprendendo todos os dias, pois nunca uma situação é igual à anterior e é necessário estar sempre atento às situações para se poder arranjar novas soluções para ela.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como principal objetivo analisar a influência do ângulo de incidência da ação sísmica na resposta de estruturas de betão armado, vendo em que medida a tipologia estrutural, em planta e altura, vai influenciar o comportamento da estrutura face ao sismo.

Em primeiro lugar faz-se uma breve revisão sobre o estudo do comportamento dinâmico de estruturas 3D, para análises estáticas e dinâmicas. Também é realizada uma revisão sobre aspetos mais gerais, onde são abordados temas como sismos, como resistir a essas forças sísmicas e sobre o regulamento utilizado para se efetuar o projeto de estruturas resistentes a ações sísmicas.

De seguida é feito um resumo sobre alguns dos estudos já efetuados por autores de várias nacionalidades. Estes estudos estão focados essencialmente no ângulo de incidência da ação do sismo tanto para estruturas regulares como para estruturas irregulares.

Neste sentido é elaborado um conjunto de modelos estruturais num programa computacional do qual, com a aplicação de vários parâmetros, são obtidas informações relativamente a esforços nos elementos estruturais e deslocamentos dos mesmos.

Com os resultados obtidos é possível criar gráficos polares, onde são representados os valores dos esforços e deslocamentos absolutos para cada caso de sismo e para cada ângulo de incidência, de 0° a 360° com intervalos de 10°. Após a elaboração destes gráficos procede-se à análise dos mesmos onde será efetuado o estudo relativamente à influência da altura da estrutura e/ou tipologia dos pilares da estrutura.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em seis capítulos, sendo que o primeiro se aplica à introdução contextual do trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se o estudo sobre o comportamento dinâmico de estruturas 3D, que se inicia com uma breve introdução seguida de aspetos gerais que são importantes para se enquadrar no tema desta dissertação. Para concluir o Capítulo 2 são descritas as análises estáticas e dinâmicas em estruturas 3D.

No Capítulo 3 abordam-se os vários estudos feitos em todo o mundo relativamente a temas muito semelhantes ao desta dissertação. Alguns desses estudos tiveram como objetivo encontrar fórmulas que representassem qual seria o ângulo crítico de incidência do sismo e a respetiva resposta estrutural, mas esses resultados ainda têm uma precisão baixa podendo no futuro serem melhoradas de maneira a virem a ser usadas para a realização de projetos de estruturas mais eficientes face à resistência aos sismos.

No Capítulo 4 descreve-se quais são os modelos utilizados e os parâmetros adotados para a obtenção dos resultados para se efetuarem as análises pretendidas.

No Capítulo 5 são feitas as análises dos resultados obtidos, sendo apresentadas as opiniões face aos resultados obtidos.

Para finalizar, o Capítulo 6 apresenta as conclusões face ao trabalho efetuado, tendo em vista a contribuição para o esclarecimento face às dúvidas existentes sobre a influência do ângulo de incidência no comportamento estrutural de edifícios de betão armado.

2

ESTUDOS SOBRE O COMPORTAMENTO DINÂMICO DE ESTRUTURAS 3D

2.1. INTRODUÇÃO

A análise dinâmica de estruturas 3D é uma extensão direta da análise estática. As matrizes de rigidez elásticas são as mesmas tanto para a análise dinâmica como para a linear, sendo que é apenas necessário agrupar a massa da estrutura aos nós. A adição de forças de inércia e forças de dissipação de energia vão satisfazer o equilíbrio dinâmico e a solução dinâmica para o estado estacionário de carregamento harmónico, sem amortecimento, envolve o mesmo esforço numérico como uma solução estática. Há muitos métodos matemáticos diferentes para resolver as equações de equilíbrio dinâmico. No entanto todos os sistemas lineares e não lineares podem ser resolvidos com um método numérico.

A energia é fundamental na análise dinâmica. A qualquer altura, o trabalho externo fornecido para o sistema deve ser igual à soma da energia cinética mais a energia dissipada no sistema.

Atualmente é necessário fazer uma análise dinâmica tridimensional para um grande número de diferentes tipos de sistemas estruturais que são construídos em zonas sísmicas. Os requisitos das forças laterais sugerem vários métodos que podem ser usados para determinar a distribuição das forças sísmicas numa estrutura.

A principal vantagem de utilizar as forças obtidas de uma análise dinâmica como base para o projeto estrutural é que a distribuição vertical de forças pode ser significativamente diferente das forças obtidas de uma análise de forças estáticas. Consequentemente, o uso das análises dinâmicas poderá possibilitar a criação de estruturas mais resistentes aos sismos do que estruturas projetadas usando forças estáticas.

Os regulamentos dos edifícios fornecem fórmulas e guias que constituem os requisitos mínimos legais no projeto e construção de edifícios num local específico. Estes requisitos têm intenção de garantir um desempenho satisfatório de uma estrutura quando esta é sujeita a ações sísmicas, sem que esta não tenha a segurança garantida quando ocorre um sismo de grande escala. O objetivo dos regulamentos relativos ao sismo é, para um sismo de pequena ou média escala, a estrutura não ficar danificada e, para um sismo de grande escala, a estrutura não colapsar.

O Eurocódigo 8 permite que os resultados obtidos a partir de uma análise dinâmica sejam normalizados para que o corte basal dinâmico máximo seja igual ao corte basal obtido de uma análise de forças estáticas 2D [4]. Contudo, para o propósito de escolher a magnitude das cargas dinâmicas que irão satisfazer os requisitos dos códigos, esta aproximação pode ser aceite, de forma modificada, até que seja adotado um método mais racional.

A principal mudança é que os métodos de análise dinâmica devem ser usados para as principais direções da estrutura. Já o Eurocódigo 8 não indica como definir as principais orientações para uma estrutura 3D com uma forma geométrica arbitrária. Por causa do esforço transversal poder ser diferente em cada direção, esta abordagem do espectro dimensionado pode produzir diferentes movimentos para cada direção tanto para estruturas regulares como irregulares.

2.2. ASPETOS GERAIS

2.2.1. SISMO

A maioria dos sismos são causados por uma repentina libertação de energia, causada por uma sobreposição, rutura ou deslizamento de duas placas da crosta terrestre. O local onde ocorre o sismo, num ponto no interior da terra é conhecido como foco sísmico ou hipocentro. O ponto na superfície da terra que se encontra diretamente acima do foco sísmico é o epicentro (Fig. 2.1).

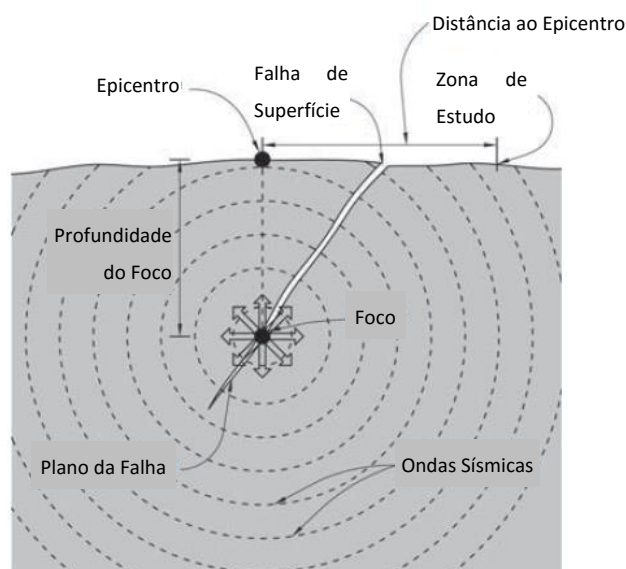


Fig. 2.1 - Ilustração com a terminologia básica dos sismos [1]

O abalo de um sismo é provocado pela rutura de uma falha que gera ondas sísmicas que partem do hipocentro. Estas ondas vão para todas as direções, sendo que estas exibem uma forma mais elíptica. A direção vai também depender de vários fatores geológicos incluindo a velocidade de propagação das ondas. A velocidade de propagação vai depender não só da intensidade do sismo mas também do tipo de solo em que este se vai propagar.

Existem três tipos de ondas geradas por uma rutura de uma falha, duas vão sobre o solo enquanto a outra vai pela superfície do solo. As ondas principais ou ondas P (*P-waves*) são as que se deslocam mais depressa, elas propagam-se pelas rochas à mesma velocidade que o som se propaga no ar, puxando e empurrando o solo. As ondas de corte ou ondas S (*S-waves*), as mais prejudiciais para os edifícios, movimentam as partículas do solo de um lado para o outro verticalmente ou horizontalmente, elas propagam-se a partir do hipocentro a cerca de uma velocidade de 3 km/s (Fig. 2.2). As ondas de superfície foram descobertas por cientistas, uma das ondas são as ondas de *Love* que vibram apenas no plano horizontal enquanto as ondas de *Rayleigh* também têm uma componente vertical. [1]

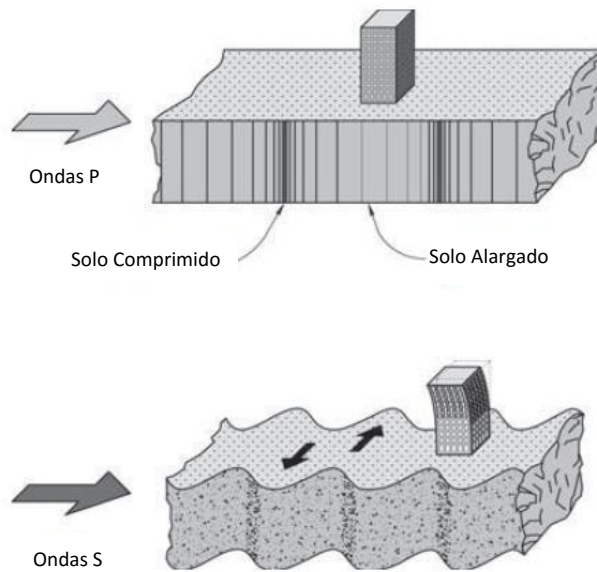


Fig. 2.2 - Movimento do solo causado pelas ondas P e S [1]

Um sismo pode ser avaliado de duas formas: uma é pela magnitude, e outra pela sua intensidade. A magnitude de um sismo é medido através de um sismógrafo. Este aparelho vai medir a amplitude do sismo que depois será convertido numa escala, mais conhecida como escala de Richter. A intensidade do sismo é classificada com base numa tabela existente, que tem 12 classificações, onde o sismo é avaliado com base na opinião das pessoas em relação ao abalo do sismo que sentiram e no aspeto visual da destruição dos edifícios que a zona afetada pelo sismo apresenta, a isto chama-se escala de Mercalli.

Com os sismos são também registadas as acelerações ao longo do tempo do sismo, mais conhecidos por acelerogramas (Fig. 2.3), através de um instrumento chamado acelerógrafo. É com estes acelerogramas que se estuda o tempo em que o sismo apresenta uma grande intensidade, a intensidade que o sismo apresenta e onde este ocorreu geograficamente. É então possível fazer análises computacionais mais rigorosas, pois são introduzidos no modelo estrutural computacional acelerogramas, de vários tipos sísmicos, que simulam com mais rigor a realidade, do que com os esforços estáticos calculados pelo EC8, que podem levar a um sobredimensionamento da estrutura. Os acelerogramas também podem ser analisados de maneira a obter o pico do movimento do solo, a duração do sismo e a frequência do sismo. A frequência do sismo pode ser influenciada pelas condições do solo, podendo para o mesmo abalo sísmico variar a frequência dependendo do tipo de solo em que este ocorre.

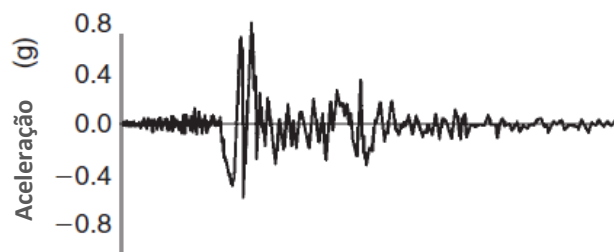


Fig. 2.3 - Exemplo de um acelerograma [1]

É através das acelerações provocadas pelo sismo que se vão gerar forças de inércia na estrutura. Essas forças vão ser tanto maiores quanto maior for a massa da estrutura, tal como se pode verificar pela segunda lei de Newton:

$$F = m \cdot a \quad (2.1)$$

As forças de inércia são forças internas, que com o movimento horizontal da estrutura devido ao abalo sísmico, vão ser geradas em toda a estrutura. Como pode ser assumido que as forças gravíticas podem atuar no centro de massa então também as forças de inércia podem. E como grande parte da massa encontra-se nas lajes de cada andar pode-se então assumir que as forças de inércia atuam no centro de massa da laje de cada andar (Fig. 2.4).

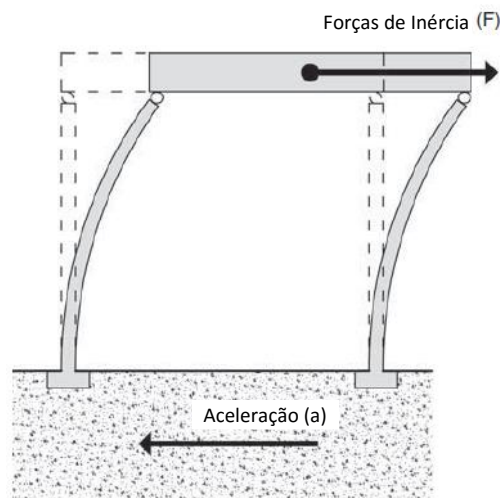


Fig. 2.4 - Força de inércia aplicada no centro de massa da laje [1]

A frequência estrutural (f) indica o número de oscilações que a estrutura tem num determinado intervalo de tempo. Se o pretendido é saber quanto tempo é que demora uma oscilação da estrutura então é designado por período (T).

É sabido que estruturas de grandes alturas, ou seja flexíveis, irão ter frequências próprias baixas, enquanto as estruturas mais baixas, ou seja mais rígidas, vão apresentar frequências próprias mais elevadas. No entanto é necessário ter em atenção a um problema que poderá existir em todas as estruturas, a ressonância. Isto é, uma estrutura vai ter tendência a oscilar na sua amplitude máxima quando é sujeita a frequências iguais à frequência natural da estrutura. Com isto é então preciso ter em atenção à frequência natural que a estrutura apresenta, para que esta não se encontre num intervalo de frequências sísmicas que possam ocorrer no local da estrutura.

Existem vários fatores que afetam severamente as forças sísmicas. Entre eles estão:

- Peso do edifício: como já referido anteriormente quanto maior a massa de um elemento maior vai ser a força gerada segundo a segunda lei de Newton. Por isso é recomendável sempre que possível utilizar materiais leves na construção dos elementos do edifício;
- Período natural de vibração: como já foi também referido anteriormente, o período natural do sismo quando é igual ao período natural da estrutura vai causar ressonância, o que levará ao colapso da estrutura. Neste caso é necessário ter em atenção à frequência da estrutura para que

não corra o risco de ser idêntica à do sismo, estudando soluções de contraventamentos ou outras para alterar a frequência da estrutura;

- Amortecimento: este é um fator menos crítico que os anteriores, contudo não deixa de merecer a sua atenção. O amortecimento, causado principalmente pela fricção interna dos elementos do edifício, diminui a amplitude das vibrações. É por isso importante que um edifício tenha amortecimento pois este absorve a energia do sismo e reduz a ressonância;
- Espectro de resposta: não influenciando diretamente as ações sísmicas, é um método conveniente para demonstrar e quantificar como é que o período natural de vibração e amortecimento de um edifício afeta a sua resposta devido ao movimento provocado pelo sismo. É através do espectro que se pode observar os períodos das estruturas evitando que tenham períodos naturais baixos para que estes não se encontrem no patamar mais desfavorável, no caso do Eurocódigo 8 deve-se evitar que os valores estejam entre T_B e T_C tal como se pode observar na Fig. 2.5;

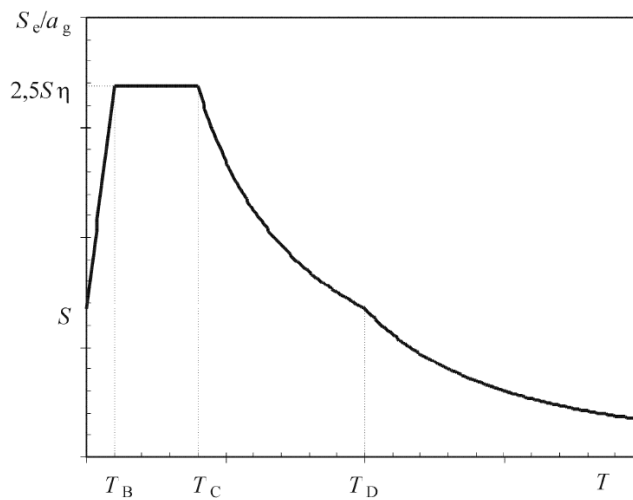


Fig. 2.5 - Espectro de resposta elástico [4]

- Ductilidade: tem uma grande influência na magnitude das acelerações e forças sísmicas para o qual um edifício é projetado. Em certas situações uma estrutura pode ter um sexto da força sísmica relativamente a uma estrutura que não seja dúctil. Esta é uma qualidade desejada numa estrutura. No caso de um sismo com uma intensidade que exceda a força de um elemento frágil, como um pilar ou viga, o elemento vai quebrar de repente, em quanto se um elemento for dúctil este vai-se deformar, exibindo um comportamento plástico até uma deformação relativamente grande sem quebrar.

2.2.2. RESISTIR ÀS FORÇAS SÍSMICAS

Para resistir às forças sísmicas com sucesso é necessário que o edifício possua robustez e rigidez, e em muitos casos também ductilidade.

- Robustez: a superestrutura de todos os edifícios deve apresentar uma estrutura robusta o suficiente para resistir aos momentos fletores e forças de corte causados pelas forças sísmicas, e a fundação deve ter capacidade para que não ocorra escorregamento e derrubamento.

- Rigidez: é tão importante quanto a robustez. Quanto mais rígida for uma estrutura menos ela se vai deformar devido às forças sísmicas, contudo ela vai apresentar um comportamento mais frágil. Mesmo que a estrutura seja forte o suficiente e se esta não apresentar grande rigidez, a estrutura vai ter grandes deformações que mesmo não sendo prejudiciais para os elementos estruturais vai ainda assim causar estragos nos elementos não estruturais. E quanto mais o edifício se deformar no topo, com as cargas verticais aplicadas no centro de massa da laje de topo, maior vai ser a instabilidade do edifício. É por esta razão que os códigos têm um limite para as deformações dos edifícios.
- Torção: ocorre quando uma estrutura não apresenta elementos posicionados de modo a que esta não seja simétrica ou quando o centro de rigidez não coincide com o centro de massa. Este assunto será aprofundado mais à frente.

2.2.3. EUROCÓDIGO 8

O documento Eurocódigo 8 aplica-se ao projeto e à construção de edifícios e de outras obras de engenharia civil em regiões sísmicas. Este tem por finalidade assegurar, em caso de ocorrência de sismos, que:

- As vidas humanas são protegidas;
- Os danos são limitados; e
- As estruturas importantes para a proteção civil se mantêm operacionais.

O Eurocódigo 8 não abrange as estruturas especiais, como por exemplo as centrais nucleares, as estruturas *offshore* e as grandes barragens, e contém apenas as disposições que, para além do disposto nos outros Eurocódigos aplicáveis, têm de ser cumpridas no projeto de estruturas em zonas sísmicas. Neste aspeto, complementa os outros Eurocódigos. [4]

O Eurocódigo 8 está dividido em várias partes, sendo que a única parte utilizada na realização desta dissertação foi a Parte 1, que se destina a projetos de edifícios e de outras obras de engenharia civil em zonas sísmicas.

As estruturas nas regiões sísmicas devem ser projetadas e construídas de forma a que sejam satisfeitos os seguintes requisitos, cada um com um grau adequado de fiabilidade:

- Requisito de não ocorrência de colapso - A estrutura deve ser projetada e construída de forma a resistir à ação sísmica de cálculo definida na secção 3 sem colapso local ou global, mantendo assim a sua integridade estrutural e uma capacidade resistente residual depois do sismo.
- Requisito de limitação de danos - A estrutura deve ser projetada e construída de forma a resistir a uma ação sísmica cuja probabilidade de ocorrência seja maior do que a ação sísmica de cálculo, sem a ocorrência de danos e de limitações de utilização, cujos custos sejam desproporcionadamente elevados em comparação com os da própria estrutura. [4]

As fiabilidades visadas pelo requisito de não ocorrência de colapso e pelo requisito de limitação de danos são estabelecidas pelas autoridades nacionais para os diferentes tipos de edifícios ou de obras de engenharia civil, em função das consequências do colapso. A diferenciação da fiabilidade obtém-se classificando as estruturas em diferentes classes de importância. A cada classe é atribuído um coeficiente de importância γ_I . Os diferentes níveis de fiabilidade obtêm-se multiplicando a ação sísmica de referência ou, quando se utiliza a análise linear, os correspondentes esforços por este coeficiente de importância. [4]

Para satisfazer os requisitos fundamentais, os seguintes estados limites devem se verificados:

- Estados limites últimos;
- Estados de limitação de danos.

Os estados limites últimos são os associados ao colapso ou a outras formas de rotura estrutural que possam pôr em perigo a segurança das pessoas.

Os estados de limitação de danos são os associados a danos para além dos quais determinados requisitos de utilização deixam de ser satisfeitos.

2.3. ANÁLISE ESTATICA

2.3.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS

A análise estática tem como principal finalidade estudar uma estrutura mas apenas com base em forças laterais. Estas forças são calculadas tendo em vista vários parâmetros como as forças permanentes, a massa e a altura.

No Eurocódigo 8 é referido que o método de referência para a determinação dos efeitos sísmicos deve ser o da análise modal por espectro de resposta, utilizando um modelo elástico linear da estrutura e o espectro de cálculo.

Em função das características estruturais do edifício, poderá utilizar-se um dos dois tipos seguintes de análise elástica linear:

- O “método de análise por forças laterais”;
- A “análise modal por espectro de resposta”, aplicável a todos os tipos de edifícios.

2.3.2. ANÁLISE ELÁSTICA LINEAR

O Eurocódigo 8 permite que a análise elástica linear seja feita utilizando dois modelos planos, um para cada direção horizontal principal, caso sejam satisfeitos os critérios de regularidade em planta, mais à frente abordados em 2.4.1., ou mesmo se a regularidade em planta não seja satisfeita, pode-se efetuar na mesma uma análise elástica linear plana em função da classe de importância, desde que sejam satisfeitas todas as seguintes condições especiais de regularidade:

- O edifício deve ter elementos de fachada e de divisórias bem distribuídos e relativamente rígidos;
- A altura do edifício não deve ser superior a 10 m;
- A rigidez dos pisos no plano deve ser suficientemente grande em relação à rigidez lateral dos elementos estruturais verticais, para que se possa admitir um comportamento rígido dos diafragmas;
- Os centros de rigidez lateral e de massa devem cada um estar aproximadamente numa linha vertical e satisfazer as seguintes condições nas duas direções horizontais de análise: $r_x^2 > I_s^2 + e_{ox}^2$, $r_y^2 > I_s^2 + e_{oy}^2$, em que o raio de giração I_s , os raios de torção r_x e r_y e as excentricidades nominais e_{ox} e e_{oy} têm de cumprir certas regras também definidas no EC8.

Se apenas a última condição não for satisfeita, pode ser feita na mesma a análise elástica linear, mas neste caso os esforços sísmicos obtidos deverão ser multiplicados por 1,25.

Para os edifícios que não cumpram as condições referidas anteriormente, deverá ser feita uma análise utilizando um modelo espacial (modelo 3D). Para tal a ação sísmica de cálculo deve ser aplicada segundo todas as direções horizontais relevantes e as direções horizontais que lhes são ortogonais. Para os edifícios com elementos resistentes em duas direções perpendiculares, estas duas direções devem ser consideradas como as relevantes.

2.3.2.1. Método de análise por forças laterais

Este tipo de análise poderá ser aplicado aos edifícios cuja resposta não seja significativamente afetada pelas contribuições dos modos de vibração mais elevados que o modo fundamental em cada direção principal. Isto é satisfeito se forem cumpridas as seguintes condições:

- Têm períodos de vibração fundamentais T_1 nas duas direções principais inferiores aos seguintes valores:

$$T_1 \leq \begin{cases} 4 \cdot T_C \\ 2,0 \text{ s} \end{cases} \quad (2.2)$$

em que T_C é definido consoante o tipo de terreno;

- Satisfazem os critérios de regularidade em altura, mais à frente abordados em 2.4.2.

A análise do edifício vai ser então realizada aplicando uma força de corte sísmica na base ou corte basal F_b , que é determinada pela seguinte expressão:

$$F_b = S_d(T_1) \cdot m \cdot \lambda \quad (2.3)$$

em que:

$S_d(T_1)$ é a ordenada do espetro de cálculo para o período T_1 ;

T_1 é o período de vibração fundamental do edifício para o movimento lateral na direção considerada;

m é a massa total do edifício, acima da fundação ou acima do nível superior de uma cave rígida;

λ é o fator de correção, cujo valor é igual a 0,85 se $T_1 \leq 2T_C$ e o edifício tiver mais de dois pisos, ou igual a 1,0 nos outros casos.

Para a determinação do período de vibração não foram utilizadas as fórmulas presentes no EC8, mas sim utilizando um programa computacional que faz uma análise mais precisa dando valores mais exatos. Mais à frente irá ser abordada a aplicação do programa computacional e dos modelos, no capítulo 4.

Após efetuado o cálculo da força de corte sísmica na base, é necessário proceder à distribuição das forças sísmicas horizontais em altura, onde foi considerado que estas crescem linearmente ao longo da altura do edifício, utilizando a expressão 2.4 (Fig.2.6), e numa outra situação em que seriam constantes ao longo da altura da estrutura.

$$F_i = F_b \cdot \frac{z_i \cdot m_i}{\sum z_j \cdot m_j} \quad (2.4)$$

em que:

F_i é a força horizontal atuante no piso i ;

F_b é a força de corte sísmica na base obtida pela expressão (2.3);

z_i, z_j que são as alturas das massas m_i e m_j acima do nível de aplicação da ação sísmica.

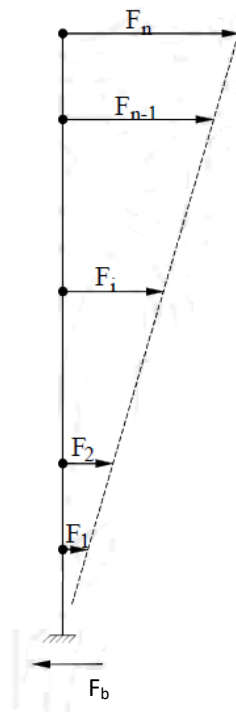


Fig. 2.6 - Distribuição linear crescente ao longo da altura [3]

2.3.2.2. Análise modal por espectro de resposta

Este tipo de análise deve ser aplicado aos edifícios que não satisfazem as condições apresentadas para o método de análise por forças laterais. Devem ser consideradas as respostas de todos os modos de vibração que contribuam significativamente para a resposta global da estrutura, que poderão ser satisfeitos se for demonstrada uma das seguintes condições:

- A soma das massas modais efetivas para os modos considerados representa, pelo menos 90% da massa total da estrutura;
- Todos os modos com massas modais efetivas superiores a 5% da massa total são considerados.

2.4. ANÁLISE DINÂMICA

2.4.1. INTRODUÇÃO

Todas as estruturas têm um comportamento dinâmico quando sujeitas a carregamentos ou deslocamentos, e todas elas podem ter um número infinito de deslocamentos. Uma análise estática pode ser justificada se os carregamentos ou deslocamentos forem aplicados muito lentamente nas estruturas, ou seja, as forças de inércia podem ser ignoradas.

É impossível fazer uma análise estrutural criando um modelo computacional com um número infinito de elementos e deslocamentos de nós, que irá simular o comportamento real da estrutura. A massa do

sistema estrutural, que pode ser estimada com precisão, é agrupada nos nós e, para estruturas elásticas lineares, as propriedades de rigidez dos elementos podem ser aproximadas com elevado grau de confiança com o auxílio dos dados experimentais. No entanto as cargas dinâmicas, as propriedades de dissipação de energia e condições das fundações são difíceis de estimar para muitas das estruturas. Para reduzir os erros causados pelas aproximações efetuadas é aconselhável realizar diferentes análises dinâmicas usando diferentes modelos computacionais, carregamentos e condições de fundação.

É possível realizar uma análise da resposta ao longo do tempo usando tanto o método da sobreposição modal ou o método de análise passo a passo. No entanto, um simples movimento do solo ao longo do tempo, para fins de projeto, não foi definido. Portanto, a maioria dos engenheiros usam o método de análise de espectro de resposta como uma aproximação básica. O primeiro passo para uma análise do espectro de resposta é o cálculo das formas dos modos 3D e frequências. [2]

2.4.2. EQUILÍBRIO DINÂMICO

Para muitos sistemas estruturais a aproximação do comportamento estrutural linear é feito para converter o estado de equilíbrio físico para o seguinte conjunto de equações diferenciais de segunda ordem:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) \quad (2.5)$$

No qual M é a matriz massa, C é a matriz do amortecimento viscoso e K é a matriz de rigidez para o sistema de elementos estruturais. Os vetores $u(t)$, $\dot{u}(t)$ e $\ddot{u}(t)$ são os deslocamentos nodais, velocidades e acelerações, respetivamente.

Nos últimos anos com o desenvolvimento de programas de cálculo, a solução exata desta equação pode ser obtida sem o uso de técnicas matemáticas complexas. Assim sendo, um engenheiro de estruturas com conhecimentos sobre equilíbrio dinâmico e dissipação de energia pode realizar análises dinâmicas de sistemas de estruturas complexos.

É importante para os engenheiros perceberem que os deslocamentos, que são retirados de um programa computacional, são deslocamentos relativos e que o carregamento fundamental numa estrutura são os deslocamentos da fundação e não as cargas aplicadas externamente nos nós da estrutura. Por exemplo, a análise estática de uma estrutura 3D é uma fraca aproximação do comportamento, sujeita a um movimento complexo da base dependendo do tempo. Para além disso, devem-se calcular deslocamentos absolutos para avaliar os sistemas de isolamento na base.

O método da sobreposição modal, que se restringe à análise linear elástica, produz a resposta completa dos deslocamentos dos nós ao longo do tempo e as forças nos elementos por causa de uma carga específica do movimento do solo. Há então duas grandes desvantagens ao usar esta abordagem: primeiro, o método produz uma grande quantidade de informação, que pode exigir um grande esforço computacional para verificar todos os cálculos como uma função de tempo; e segundo, a análise tem de ser repetida para os vários movimentos sísmicos para assegurar que todos os modos são excitados, pois o espectro de resposta para um sismo, numa direção específica, não é uma função simples.

Existem vantagens computacionais significativas usando o método do espectro de resposta da análise sísmica, para a previsão de deslocamentos e forças nos elementos no sistema estrutural. O método envolve o cálculo apenas dos valores máximos dos deslocamentos e forças dos elementos em cada modo usando um espectro de cálculo simples que é a média dos vários movimentos sísmicos.

A aproximação básica usada para resolver as equações de equilíbrio dinâmico no domínio da frequência é expandir as cargas externas $F(t)$ em termos da série de Fourier. Contudo o uso do método das soluções no domínio da frequência para resolver estruturas sujeitas a sismos tem as seguintes desvantagens:

1. Soluções difíceis de verificar.
2. O carregamento sísmico não é periódico, assim é necessário escolher um longo período de tempo para que a solução de um comprimento sísmico finito é completamente amortecida antes da aplicação do mesmo sismo no início do próximo período de carregamento.
3. Para um carregamento do tipo sísmico, o método não é numericamente eficaz. A transformação do resultado do domínio da frequência para o domínio do tempo requer um grande esforço computacional.
4. O método é restrito para a solução de sistemas estruturais lineares.
5. O método foi usado para aproximar soluções sistemas estruturais não lineares de zonas com problemas de resposta e interação estrutural. Tipicamente é usado de uma maneira iterativa para criar equações lineares. Os termos de amortecimento linear são mudados depois de cada iteração para aproximar a dissipação de energia no solo. Consequentemente o equilíbrio dinâmico dentro do solo não é satisfeito.

A solução passo a passo das equações de equilíbrio dinâmico, a solução no domínio da frequência e a avaliação de valores próprios e vetores Ritz requerem todos a solução das equações lineares na seguinte forma:

$$AX = B \quad (2.6)$$

Onde A é uma matriz simétrica ‘ N por N ’ que tem um grande número de termos zero. As matrizes X ‘ N por P ’ – deslocamentos - e B - carregamentos -, indicam que mais do que uma condição de carga pode ser resolvida ao mesmo tempo.

O método usado em muitos programas computacionais, incluindo o SAP2000, é baseado no perfil ou método de pilar ativo de um armazenamento compacto. Por a matriz ser simétrica, só é necessário formar e guardar o primeiro termo que não seja zero em cada coluna abaixo para o termo diagonal nessa coluna. Assim, a escassa matriz quadrada pode ser guardada como um grupo unidirecional com um grupo de inteiros N por 1 que indica a localização de cada termo diagonal.

Uma falha no Eurocódigo 8 é a falta da definição das “direções horizontais principais” para uma estrutura 3D em geral. Se a cada engenheiro fosse permitido arbitrar um sistema de referência, o corte basal dinâmico não iria ser único e cada sistema de referência podia resultar num projeto diferente. Uma solução para este problema que vai resultar num único corte basal é usar a direção do corte basal associado com o modo fundamental de vibração como a definição da direção principal para a estrutura. A direção secundária vai ser por definição 90 graus do eixo principal. Esta aproximação tem bases racionais porque é válido em estruturas regulares.

Para o presente trabalho as direções principais não demonstraram ser um “problema” visto que o objetivo é analisar qual é o ângulo crítico da estrutura, para isso foi necessário colocar todas as hipóteses de quais são os eixos em que as forças estão aplicadas.

O cálculo exigido das forças sísmicas pode vir de qualquer direção horizontal e, para intenções de projeto, elas podem ser consideradas a atuar não correntemente na direção de cada eixo principal da estrutura. Para fins de dimensionamento de elementos, os efeitos do carregamento sísmico pode ser combinada em duas direções ortogonais através da raiz quadrada da soma dos quadrados (RQSQ).

Para satisfazer os requisitos correntes é necessário recorrer a duas análises de espectros separados, no eixo principal e secundário. Em cada análise é utilizado o método da combinação quadrática completa (CQC) para contar precisamente para os efeitos de interação modal na estimativa dos valores máximos de resposta. O espectro usado em ambas as análises pode ser diretamente obtido das formas do espectro de resposta normalizadas dadas pelo Eurocódigo 8.

O deslocamento e distribuição de forças é calculado usando o método básico RQSQ para combinar os resultados de 100% do espectro escalado aplicado em cada direção. Se duas análises são conduzidas em duas direções ortogonais quaisquer, no qual o método CQC é usado para combinar os máximos modais para cada análise, e os resultados são combinados usando o método RQSQ, os mesmos resultados irão ser exatamente obtidos independentemente da orientação do sistema de referência ortogonal. Assim a direção do corte basal do primeiro modo define o sistema de referência do edifício. [1]

A possível torção do movimento do solo, a imprevisível distribuição das massas de sobrecarga e a variação das propriedades estruturais são três razões que ambas as estruturas regulares e irregulares devem ser projetadas para cargas de torção acidentais. Também, para uma estrutura regular, as forças laterais não excitam os modos de torção. Esta aproximação não é prática porque as propriedades dinâmicas básicas da estrutura vão ser diferentes para cada análise. Por esse motivo foram ignorados os valores relativos à torção dos elementos, que se apresentam no capítulo seguinte.

2.4. REGULARIDADE ESTRUTURAL

2.4.1. REGULARIDADE EM PLANTA

Comparando o desempenho sísmico de membros estruturais individuais, como as vigas e pilares, a configuração da construção implica uma visão de um edifício de uma perspectiva sísmica. O efeito da configuração da construção, no desempenho sísmico, é destacado depois de cada sismo. Em grande medida a qualidade da configuração de um edifício determina como ele se aguenta perante um forte sismo.

Os arquitetos são os primeiros responsáveis pela configuração do edifício. Eles determinam a forma geral de um edifício e, com ou sem a ajuda de engenheiros de estruturas, determinam a disposição estrutural para atender a função do edifício e os requisitos do planeamento espacial, bem como para expressar os seus conceitos arquitetónicos. [1]

Contudo são os engenheiros que têm de arranjar soluções que agradem aos arquitetos sem prejudicar o comportamento da estrutura face a um sismo. Muitos fatores influenciam o comportamento de uma estrutura, um dos mais importantes é a regularidade em planta. Para isso os engenheiros vão procurar reduzir ou mesmo eliminar as irregularidades. Tendo por base o Eurocódigo 8 é necessário fazer uma análise da estrutura quanto à sua regularidade, utilizando cinco tipos de irregularidade horizontal:

- Torção,
- Cantos de reentrância,
- Descontinuidade do diafragma,
- Compensações fora do plano, e

- Sistemas não paralelos. [1]

Tendo irregularidade vai significar que é necessário um maior tempo/custo de projeto e consequentemente um aumento do seu custo, enquanto se a estrutura é regular o projeto é feito utilizando métodos mais simples. No caso de ser irregular o engenheiro de estruturas constrói um modelo completo 3D num software computacional antes de o submeter a forças sísmicas especificadas nos códigos. E mesmo através de um processo analítico complexo, a precisão é limitada por incertezas inerentes a pressupostos do modelo, não podendo garantir o desempenho sísmico perfeito. É com base em observações de edifícios danificados pelos sismos que os engenheiros experientes reconhecem que o desempenho de edifícios com configuração horizontal irregular seja improvável de ser tão bom quanto o de estruturas mais regulares.

A irregularidade leva a outras desvantagens estruturais, onde os códigos podem exigir que as conexões estruturais e membros sejam mais fortes que o normal, portanto mais caro. Os códigos podem também exigir que haja maiores forças ao nível de projeto. Mas há casos em que o código proíbe que estruturas irregulares sejam construídas em regiões de atividade sísmica elevada.

A torção é o fenómeno de rotação que ocorre em elementos estruturais, tais como pilares, vigas, paredes e lajes, sendo que quando ocorre no plano da laje esta é influenciada pela disposição dos pilares e/ou paredes da estrutura.

Estes pilares e/ou paredes com as suas diferenças em termos de inércia e disposição em planta levam a que muitas das vezes o Centro de Rigidez (CR/CoR) não coincida com o Centro de Massa (CM/CoM) de um piso ou vários dependendo de edifício para edifício. A distância entre o CR e o CM, mais conhecida como excentricidade, vão influenciar as ações sísmicas, pois são sempre aplicadas no CM de cada piso e estas forças multiplicadas pela excentricidade vão gerar torção no edifício, pois este vai rodar sobre o CR, tal como está exemplificado na Fig. 2.7.

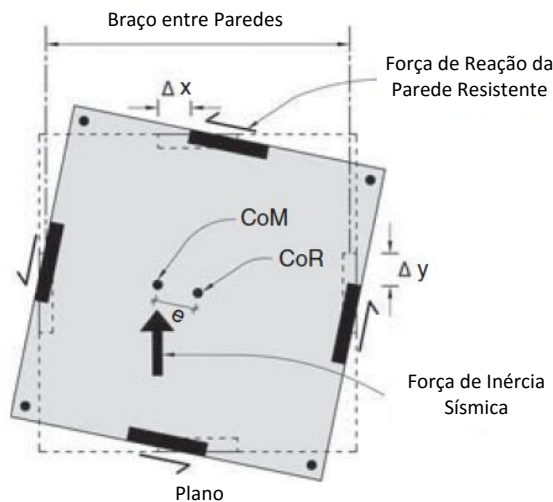


Fig. 2.7 - Exemplo de Torção num piso [1]

O efeito de torção é um dos mais prejudiciais para um edifício visto que, com a rotação da laje, vai criar esforços adicionais aos pilares, principalmente aos que estiverem mais distantes do CR. Uma das soluções é a colocação de paredes, de forma simétrica, pois são um elemento estrutural de grande rigidez que ajuda a aliviar a força de torção exercida na estrutura.

É conveniente que a estrutura seja o mais regular possível em planta para que o CR fique o mais próximo possível do CM, para que caso haja torção esta seja o menor possível.

Os cantos de reentrância são cantos que se encontram em edifícios em L, U, C, etc. Neste tipo de edifícios as forças sísmicas quando aplicadas levam a que o edifício tenha tendência a que o formato, por exemplo, em L se “abra”, ou seja, que as duas partes perpendiculares entre si do edifício se comece a fissurar tal como está representado na Fig. 2.8.

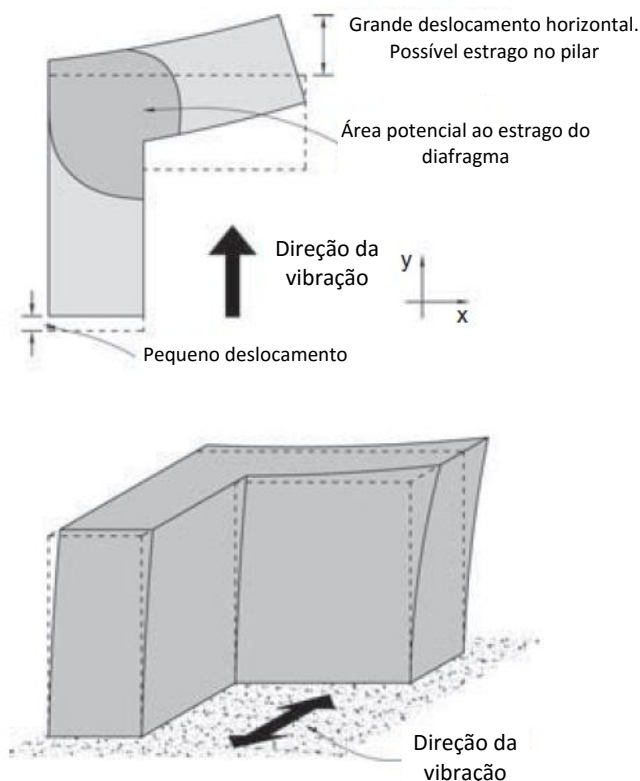


Fig. 2.8 - Edifício em L com problemas impostos no canto de reentrância [1]

Este tipo de edifícios deve ser evitado fazendo com que seja apenas uma estrutura; devem antes ser feitos como se fossem duas estruturas distintas utilizando, por exemplo, juntas entre elas para criar a morfologia do edifício pretendida, neste caso em L. Outro método é reforçar as partes críticas, incluindo o canto de reentrância, com paredes de betão armado para aumentar a resistência da estrutura nas zonas mais frágeis. Com a aplicação deste método não convém esquecer que se deve ter em atenção a disposição das paredes e pilares para garantir que o CR fica o mais próximo possível do CM. [1]

Isto evitará que um dos lados da estrutura seja afetada pelo outro lado quando esse lado é sujeito a forças na direção de menor inércia criando uma grande concentração de esforços na ligação da estrutura entre as partes perpendiculares entre si.

As lajes são um elemento estrutural muito importante para aumentar a rigidez da estrutura. As lajes muitas das vezes têm como função de diafragma, ou seja, um elemento considerado infinitamente rígido no plano que não tem qualquer deformação em planta. O ideal é que os diafragmas não sejam penetrados por nada superior a 300 mm, como por exemplo tubagens, e sejam planos ao longo de toda a planta. No entanto, a maioria dos edifícios são obrigados a grandes vazios para que haja circulação vertical, tais

como escadas e elevadores. Existem outras operações, incluindo a aplicação de condutas de ar e tubos, que necessitam de atravessar as lajes, que podem introduzir potenciais fraquezas no diafragma. [1]

Um dos principais problemas com as lajes é quando estas apresentam áreas vazias tanto no meio como nas extremidades, criando assim fragilidades na laje, ou ter diferentes configurações de andar para andar. Outro problema ocorre quando as lajes de mais de um andar tem mais de um nível, isto é, parte da laje tem uma certa cota e a restante tem outra, apresentando assim um degrau (Fig. 2.9).

O diafragma, não sendo agora linear devido ao degrau, não vai ser capaz de transferir as forças linearmente, como acontece num diafragma linear. Outro problema causado pelo degrau é para evitar que as forças de inércia na direção X da extremidade do lado direito do edifício sejam transferidas para as duas paredes que atuam nessa direção.

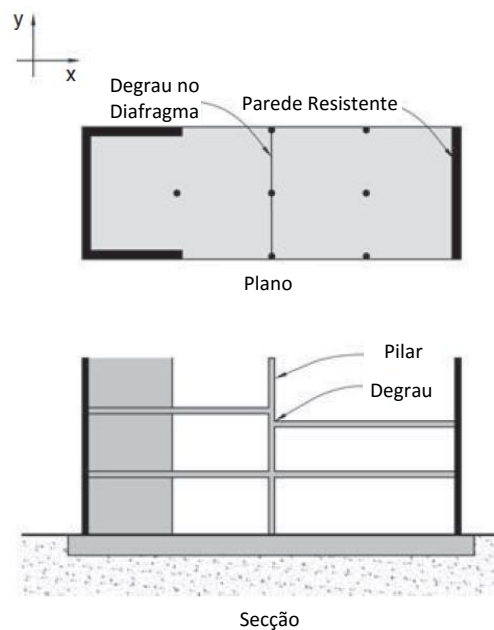


Fig. 2.9 - Laje com um degrau [1]

Duas maneiras de superar esses problemas são: primeiro, separar completamente a construção em duas estruturas; ou em segundo, a introdução de uma parede ou quatro ao longo da linha do degrau e proporcionar paredes na direção X em cada extremidade do edifício. Assim existem dois diafragmas separados pela altura do degrau. Se o degrau é alto um diafragma irá aplicar forças diretamente para os pilares centrais. Isso poderia levar a uma rotura prematura e a melhor abordagem a fazer é separar os seus elementos de suporte em duas estruturas independentes. [1]

Um sistema não paralelo é aquele que apresenta um ângulo relativamente a um conjunto de eixos ortogonais com as paredes resistentes (Fig. 2.10). A capacidade de cada configuração de resistir às forças horizontais e torsão é compreendido considerando o comprimento de cada sistema vertical como um vetor de força.

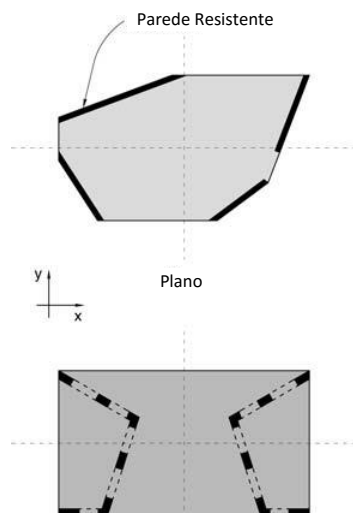


Fig. 2.10 - Dois exemplos de sistemas não paralelos [1]

Mas o que é menos óbvio é que quando estes sistemas resistem às forças horizontais, a sua orientação enviesada leva a forças secundárias inesperadas, que são necessárias para manter o equilíbrio. Numa construção configurada simetricamente os diafragmas devem proporcionar forças de torção e compressão para manter o sistema estável. Quando a configuração de sistemas não paralelos é assimétrica a distribuição dessas forças torna-se mais complexa. Por este motivo os regulamentos insistem para que os engenheiros de estruturas modelam sistemas 3D não paralelos de modo a obterem projetos com esses efeitos.

2.4.2. REGULARIDADE EM ALTURA

A configuração vertical de um edifício engloba dois aspetos de forma arquitetónica: o envolvimento do perfil do edifício em altura e a ascensão dos sistemas estruturais verticais em ambos os sentidos ortogonais. A configuração pode apresentar problemas para a estrutura relativamente ao seu comportamento estrutural face a ações sísmicas, sendo elas:

- Andares com diferentes massas,
- Estrutura vertical de um andar mais flexível e/ou mais fraco que o acima,
- Pilares curtos,
- Descontinuidade, e
- Uma mudança brusca da dimensão do plano do piso até ao topo do edifício. [1]

Cada configuração que seja irregular modifica a resposta dinâmica de um edifício e aumenta os danos estruturais e não estruturais. Algumas irregularidades, de pequenas a moderadas, são aceitáveis para engenheiros de estruturas, e os regulamentos de projeto são tratados através da aplicação de técnicas de projeto mais sofisticadas. A situação de um piso pesado é um exemplo. Locais de aumento de tensões e deslocamentos relativos entre pisos de um andar pesado, como é o exemplo de uma andar com uma piscina, são identificados pelo engenheiro de estruturas que elabora um projeto mais exigente que o normal. As restantes irregularidades afetam seriamente o desempenho sísmico de um edifício que devem ser evitadas a todo o custo.

Configurações verticais fracas acarretam caminhos de forças descontínuos ou complexidades, que afetam membros estruturais e são geralmente incapazes de lidar com os esforços, sem que ocorram danos severos.

A configuração dos andares “frágeis” em termos de resistência pode variar, podendo ser eles mais flexíveis e/ou mais fracos do que outros andares da estrutura. O problema é que as forças sísmicas vão-se concentrar no andar mais frágil causando grande impacto nos pilares que estão ligados a esse andar. Um edifício com andares “frágeis” está condenado, onde os pilares desses andares vão colapsar pois não vão aguentar com a força sísmica o que leva ao colapso desse andar e como consequência o resto da estrutura.

De todos os problemas da configuração vertical, os andares “frágeis” são os mais problemáticos, e é a razão que mais prevalece para o colapso de edifícios com vários andares. Andares “frágeis” são causados também por irregularidades em altura, tais como por exemplo, ter o andar junto ao solo apresentando apenas pilares, enquanto os outros andares já apresentam paredes de enchimento (Fig. 2.11 (a)), o que leva a que o andar sem paredes de enchimento vai ser o andar mais fraco, logo o que vai aguentar com todas as forças horizontais levando ao seu colapso.

Outra configuração irregular é quando um andar apresenta um pé direito maior que todos os outros ou quando um andar está mais aberto, ou seja, não apresenta continuidade dos pilares para o andar de baixo (Fig. 2.11 (b) e (c)). Felizmente podem ser usadas dois métodos para corrigir a irregularidade: separação ou diferenciação.

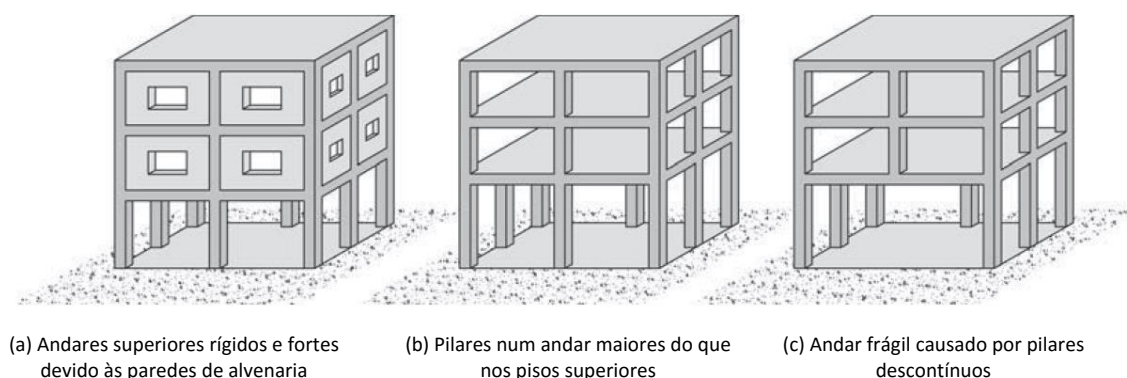


Fig. 2.11 - Exemplos de andares frágeis [1]

A separação envolve o isolamento do caminho dos elementos de rigidez e de força, como paredes e vigas, que ficam relativamente aos elementos adjacentes, pilares, mais flexíveis ou fracos. Isto quer dizer retirar o excesso de força das vigas de modo a obter vigas mais fracas relativamente aos pilares, para que ocorra rotura nas vigas antes de ocorrer nos pilares, pois os pilares são os elementos fundamentais para suportar a estrutura. Assim a ligação entre a viga e pilar torna-se mais dúctil e a viga pode ficar também mais flexível, por isso esse aspeto requer atenção por parte dos engenheiros. Nesse caso a melhor solução seria alargar a dimensão do pilar para resistir às forças sísmicas.

A diferenciação descreve a perspetiva de um projetista que distingue claramente entre estruturas resistentes à gravidade e estruturas resistentes ao sismo e assegura que os elementos principais resistem tanto a forças sísmicas como gravíticas.

Para além destas duas soluções ainda existem outras duas soluções. A primeira delas consiste na colocação de vigas, sem laje, em andares com um pé direito elevado, garantindo assim a arquitetura desejada

e ao mesmo tempo dar rigidez a esse andar evitando que este se torne um andar frágil. A outra solução é a criação de vigas fixas nas suas extremidades, em pisos alternados, de forma a evitar que estes participem com momentos para os pilares. Esta última solução apresenta uma grande desvantagem, pois é com o aumento da altura dos andares que as dimensões destas fixações leva a que seja preciso analisar o incremento de deslocamentos relativos entre pisos, momentos e esforço transversal.

Não são apenas as estruturas com pilares longos que devem ser evitadas, são também as estruturas que apresentam pilares curtos e frágeis que devem ser evitadas.

Há dois tipos de problemas dos pilares curtos: primeiro, quando há vários pilares mais curtos num lado do edifício em relação ao outro; e o segundo, quando os pilares são curtos estes são frágeis. Os pilares curtos do segundo grupo são normalmente pilares com comprimento normal que são impedidos de se fletir ou mover horizontalmente no seu comprimento total devido a paredes de alvenaria ou vigas muito altas.

A rigidez de um pilar face a deslocamentos é extremamente sensível ao seu comprimento; na verdade, inversamente proporcional ao comprimento do pilar ao cubo. Numa situação em que um pilar é metade de outro, o pilar mais curto é então oito vezes mais rígido que o outro, então este tende a resistir oito vezes mais à força do que o pilar mais longo (Fig. 2.12).

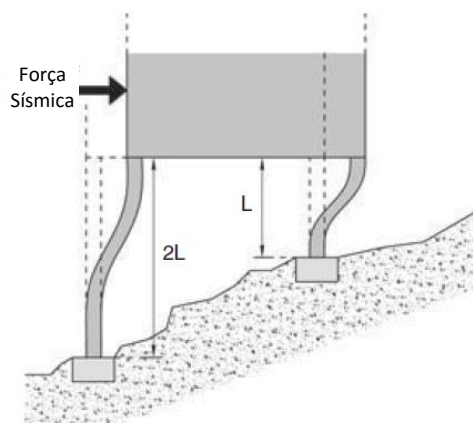


Fig. 2.12 - Dois pilares de diferentes alturas sujeitos a força sísmica [1]

Este problema dos pilares curtos pode ser resolvido de várias formas. Uma é a aplicação da diferenciação que irá aliviar o pórtico com um ou mais pilares curtos de qualquer responsabilidade de resistência sísmica. Se as vigas que amarram os pilares, formando pilares curtos, estiverem presas em ambas as extremidades, isso duplica efetivamente o comprimento dos pilares e torna-os de igual comprimento tanto quanto a resistência sísmica que está em causa. Isto claro vai criar um cenário de andar “frágil” que precisa de ser tratado.

Uma solução para resolver o problema de pilares curtos num terreno inclinado é prolongando os pilares para dentro do solo integrando-os com estacas. Se as estacas são monolíticas com os pilares e protegidas do contacto com o solo por mangas ou coberturas que permitem o deslizamento horizontal, então é evitado o pilar curto (Fig. 2.13). Por fim basta verificar se isto não cria um andar frágil com a modificação da fundação, tornando o pilar mais longo que o previsto.

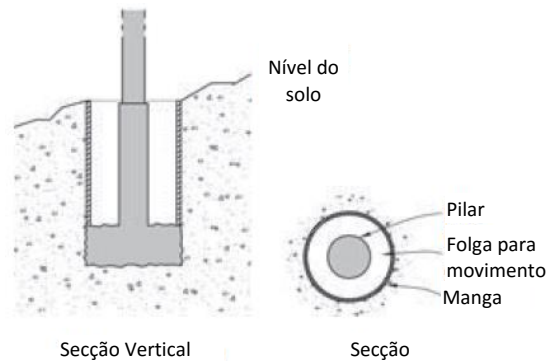


Fig. 2.13 - Método de evitar um pilar curto numa encosta [1]

As estruturas podem apresentar descontinuidades, muitas das vezes em altura nos elementos estruturais resistentes, tais como as paredes resistentes. Um exemplo dessa situação é a existência de aberturas, por exemplo para portas ou janelas, nas paredes resistentes (Fig. 2.14), onde irá criar um ou mais andares com fragilidades pois não vão ser capazes de fazer uma distribuição de esforços linearmente e apresentam andares mais frágeis para poderem resistir às ações a que a estrutura fica submetida.

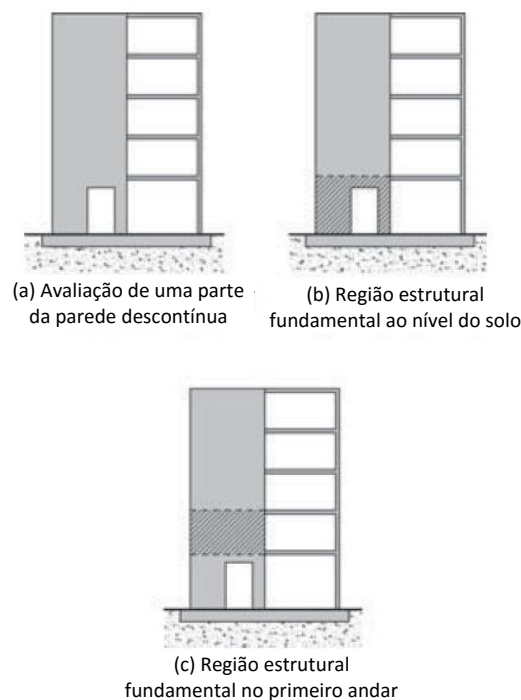


Fig. 2.14 - Descontinuidade parcial de uma parede [1]

Isto deve ser evitado, havendo várias soluções, uma delas é ter uma parede em toda a altura do edifício para que este quando se deformar seja de forma gradual e flexível evitando que este não crie zonas de grande concentração de esforços num só local específico do edifício, tornando esta zona frágil. Outra é a colocação de contraventamentos em vez de paredes resistentes ou em zonas que substituam a interrupção das paredes resistentes, o que irá tornar o edifício mais leve e ao mesmo tempo mais resistente quando à solicitação por parte da estrutura face a forças horizontais.

Um recuo em planta é quando a dimensão de um plano de um edifício de vários andares reduz a um certo nível. Os regulamentos caracterizam edifícios com um recuo brusco em planta como irregulares. Análises estruturais sofisticadas quantificam o ‘efeito de entalhe’ de um recuo em planta, mas mesmo que os engenheiros de estruturas evitem entalhes sempre que possível por causa da concentração de tensões, os recuos em planta podem ser projetados de forma satisfatória. Embora a configuração vertical possa ser projetada para a direção X, a vibração na direção Y induz torsão devido à forma como as posições do CR e CM mudam a cada recuo em planta.

Os projetistas são defrontados com várias opções. Podem tratar o edifício como uma estrutura, neste caso o telhado do “pódio” provavelmente é concebido como um diafragma de transferência para forçar o pórtico do “pódio” a contribuir para a resistência à força horizontal no piso inferior do edifício (Fig. 2.15 (a)). Alternativamente, os projetistas podem efetuar o “pódio” com pouca ou nenhuma resistência horizontal e amarrar fortemente à estrutura primária da torre principal, que em seguida resiste à força sísmica de todo o edifício (Fig. 2.15 (b)). Finalmente, o “pódio” pode ser sismicamente separado da torre, criando assim várias estruturas (Fig. 2.15 (c)). A torre torna-se então uma estrutura regular com um comportamento sísmico mais previsível. Um “pódio” estruturalmente independente deve ser autosuficiente sismicamente pelo que requer a sua própria estrutura sísmica. Certamente numa situação em que a torre é muito maior que o “pódio” irá encorajar a separação de ambos para evitar adicionar a complexidade da torção.

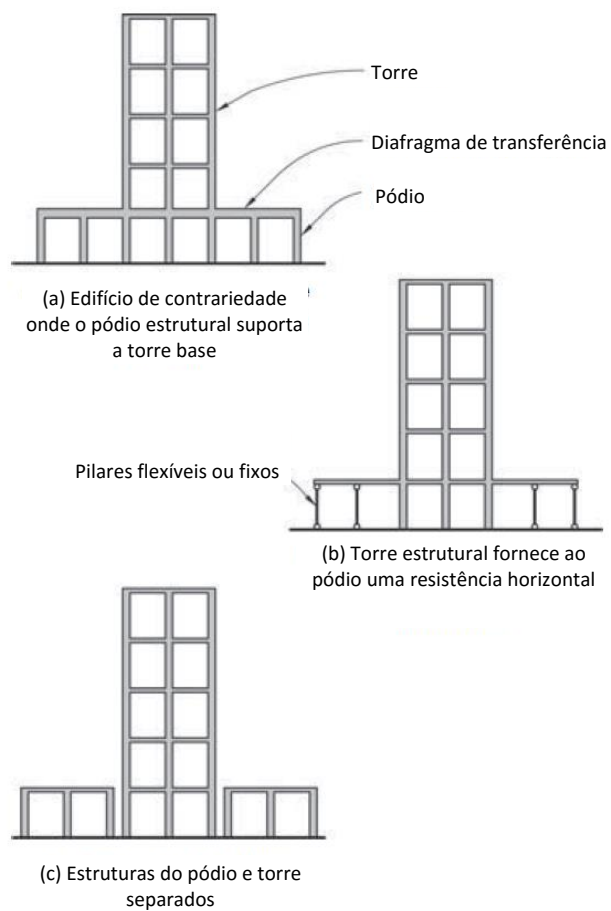


Fig. 2.15 - Diferentes configurações da torre e "pódio" [1]

3

ÂNGULO CRÍTICO DE INCIDÊNCIA**3.1. INTRODUÇÃO**

Em quase todas as considerações dos códigos de projeto sísmico os efeitos simultâneos de duas componentes horizontais de excitações sísmicas são tidos em conta através da aplicação de 100% das forças laterais sísmicas na direção de um eixo principal do edifício e 30% dessas forças na direção do outro eixo principal. Sendo que na realidade a direção da componente dominante das excitações pode não ser uma das direções principais dos eixos do edifício, e aplicando a componente principal noutra direção que as direções dos eixos principais pode levar a maiores forças internas e esforços nos elementos estruturais do edifício. Alguns pesquisadores trabalharam no efeito do ângulo de excitação nos valores de resposta desde meados dos anos 80. [10]

Wilson e Button [21] propuseram um método para calcular o ângulo crítico de incidência e a resposta estrutural, que define o movimento do solo sob um espectro de resposta podendo ser aplicado em estruturas através de um cálculo prático. Contudo este método é aproximado pois não tem em conta uma correlação correta das componentes do movimento do solo quando estas atuam nas principais direções da estrutura. Mais recentemente Wilson *et al.* [22] discutiu a precisão dos procedimentos práticos usados para considerar a ação simultânea de duas componentes sísmicas e propôs uma fórmula para determinar a direção crítica de um sismo; através de uma versão alterada da original, continuou a ignorar a correlação das componentes da aceleração do solo ao longo das direções referenciais da estrutura. [11]

O movimento translacional de um sismo induzido num ponto específico do solo é registado segundo duas direções horizontais e uma vertical. Em geral, estas componentes de translação do movimento do solo são processos correlacionados, mas de acordo com Penzien e Watabe [17] existem conjuntos de direções ortogonais ao longo das quais as componentes do movimento do solo podem ser consideradas não correlacionadas. Estas direções representam as direções principais e são usadas para determinar a sua orientação crítica, isto é, a orientação que tem o maior valor de resposta. Esta determinação pode ser alcançada através da aplicação do método do espectro de resposta. [7]

Anastassiadis [5] usando uma metodologia mais simples desenvolveu as propriedades tensoriais de uma quantidade de resposta arbitrária para o caso geral de excitação sísmica ortotrópica e o cálculo direto das respostas máximas sem a determinação prévia do ângulo crítico de incidência. [7]

Smeby e Der Kiureghian [19] usando a teoria da vibração aleatória desenvolveram uma fórmula explícita para determinar o ângulo crítico para o caso de duas componentes horizontais do solo com espectros de formas idênticas que tem em conta uma correlação adequada entre componentes sísmicas. Para o caso do cálculo de diferentes espectros, os autores calcularam o momento espectral de resposta da qual toda a distribuição provável pode ser obtida. Menun e Der Kiureghian [15] apresentaram a regra da

combinação quadrática completa com três componentes sísmicas (CQC3) para a determinação do ângulo crítico de incidência e a resposta máxima correspondente. [7,11]

As respostas críticas são definidas como máximo e mínimo das respostas estruturais considerando qualquer ângulo de incidência do sismo. Ângulos críticos são ângulos de incidência do sismo que produzem as respostas máximas. Os procedimentos para obter os ângulos críticos e as respostas críticas baseadas na análise do espectro de resposta são conhecidos. Tais procedimentos foram propostos por Smeby e Der Kiureghian [19] e Lopéz e Torres [11] baseados em diferentes pontos de vista. Estes procedimentos são normalmente identificados através da regra da combinação quadrática completa com três componentes sísmicas ou CQC3. Uma resposta estrutural mais precisa pode ser obtida com a análise da história de resposta (AHR); contudo, para aplicações práticas é necessário recorrer ao uso de vários movimentos do solo e daqui esforços numéricos enormes. Vários exemplos deste procedimento estão presentes na literatura técnica. [14]

Finalmente em Menun e Der Kiureghian [16] e Anastassiadis *et al.* [6] o ângulo crítico de incidência para a combinação mais desfavorável de duas ou mais quantidades de resposta simultâneas é determinado. É de notar que todas as investigações acima são baseadas na suposição do modelo de Penzien-Watabe e no uso do método do espectro de resposta. [7]

Lopéz e Torres [11] tentaram apresentar um método simples, no qual pode ser aplicado em regulamentos de edifícios para determinar o ângulo crítico de incidência do sismo e o correspondente pico de resposta das estruturas sujeitas a duas componentes horizontais aplicadas ao longo de qualquer direção arbitrária e para a componente vertical do movimento do sismo no solo. No método, as componentes sísmicas são dadas em termos de espectros de resposta que podem ser iguais ou ter diferentes formas espectrais. Nesse estudo as estruturas são discretas, sistemas lineares com amortecimento viscoso. O método, no qual é baseado no método da análise do espectro de resposta, necessita da solução dos casos normalizados da análise sísmica e portanto pode ser implementada mais facilmente em programas de computador. Para o caso geral de três espectros de resposta arbitrários, o método requer uma solução de cinco casos de carga sísmica, dois para cada componente horizontal e uma para a componente vertical. Se o espectro de resposta horizontal tiver a mesma forma ou se tiver apenas uma componente horizontal, então é necessário resolver apenas dois casos de carga sísmicos para as componentes horizontais e uma para a componente vertical. López e Torres demonstraram que as fórmulas derivadas para os ângulos críticos e o pico de resposta são essencialmente idênticos aos obtidos anteriormente por Smeby e Der Kiureghian usando a teoria da vibração aleatória. [10]

López *et al.* [11, 12] provaram que o valor crítico de resposta, para uma quantidade única de resposta, pode ser até 20% maior do que a resposta usualmente produzida quando as componentes sísmicas são aplicadas ao longo dos eixos da estrutura. [7]

López e os seus colegas, em 2000, tentaram mais tarde desenvolver uma melhor compreensão da resposta crítica nas estruturas para várias componentes do movimento do solo caracterizadas por três componentes não correlacionadas que são definidas ao longo dos seus eixos principais: duas horizontais e uma componente vertical. Eles derivaram uma fórmula explícita para calcular o valor crítico da resposta estrutural para as duas principais componentes horizontais atuantes ao longo de qualquer ângulo de incidência com respeito aos eixos estruturais, e a componente vertical do movimento do solo. Eles definiram a resposta crítica como o maior valor de resposta para todos os possíveis ângulos de incidência. Eles mostraram que o rácio r_{cr}/r_{SRSS} entre o valor crítico de resposta e a resposta SRSS – correspondente às principais componentes da aceleração do solo aplicadas ao longo dos eixos da estrutura – dependem de três parâmetros dimensionais: o rácio da intensidade do espectro γ entre as duas principais compo-

nentes do movimento horizontal do solo caracterizados pelo formato do espectro $A(T_n)$ e $\gamma A(T_n)$; o coeficiente de correlação α das respostas r_x e r_y devido ao formato espectral $A(T_n)$ aplicado nas direções x e y , respetivamente; e $\beta = r_y/r_x$. Eles demonstraram que o rácio r_{cr}/r_{SRSS} está delimitado por 1 e $\sqrt{(2/1 + \gamma^2)}$, assim o maior valor do rácio é $\sqrt{2}$; 1,26; 1,13 e 1,08 para $\gamma=0$; 0,5; 0,75 e 0,85, respetivamente. Isto implica que a resposta crítica nunca exceda $\sqrt{2}$ vezes o resultado da análise SRSS, e este rácio é por volta de 1,13 para valores típicos de γ , digamos 0,75. Eles discutiram que o coeficiente de correlação α das propriedades estruturais mas está sempre delimitado entre -1 e 1. Para um valor fixo de γ , o rácio r_{cr}/r_{SRSS} é maior se $\beta=1$ e $\alpha=\pm 1$. Nesse estudo as variações paramétricas presentes para edifícios de um piso indicam que a sua condição pode ser satisfeita por forças axiais em pilares de edifícios de simetria plana ou pode ser aproximada por deslocamentos laterais em elementos resistentes de edifícios não simétricos em plano. [10]

Adman Cakiroglu e Cheng e Ger indicaram a importância das direções sísmicas embora o ângulo crítico de incidência não tenha sido apresentado numa forma explícita. [11]

O efeito da introdução de seis componentes sísmicas e a introdução da direção na resposta de estruturas tridimensionais ao usar a análise ao longo do tempo, o método transacional torsional espectral (MTTE), e o método de resposta máxima (MRM) foram estudadas. Eles afirmaram que para o MRM, a direção sísmica crítica imposta deve ser determinada; MTTE, contudo, não depende da direção sísmica imposta, e para ambos os casos o rendimento apresenta resultados similares. Eles descreveram as derivações matemáticas, e mostraram por exemplos numéricos que a resposta estrutural é significativamente influenciada pelas componentes sísmicas e as direções impostas. [10]

González apresentou um método aproximado que inclui o efeito da direção sísmica na análise dinâmica dos edifícios, no qual determina o ângulo crítico em cada modo de vibração; os exemplos apresentados apresentaram erros relativos que diferiram até 30% dos verdadeiros valores. [11]

A comparação entre resultados obtidos com o ASR e AHR é de suprema importância, devido às características do tempo evitado nos procedimentos baseados no espectro e a sua conveniência dos propósitos de projeto. Contudo, há pouca informação na literatura técnica referente à comparação entre o ASR e AHR. Biggs *et al.*, em 1977, compararam os resultados obtidos do AHR, usando vários movimentos do solo, e aqueles obtidos com o ASR, usando o espectro principal para os movimentos do solo, para pórticos de betão reforçado em 2D. Os autores concluíram que o ASR é adequado para propósitos de projeto. Mais recentemente, Chopra e Chintanapakdee, em 2001, compararam os resultados obtidos com o AHR e ASR para o corte de uma viga considerando um movimento junto ao solo e um movimento afastado do solo. Os autores concluíram que o ASR é adequado a propósitos de um projeto prático. [14]

Considerando a resposta estrutural não elástica, MacRae e Mattheis, em 2000, investigaram a influência do ângulo de incidência no comportamento não elástico de um edifício metálico de três andares sujeito a movimentos do solo perto de falhas. Eles concluíram que os deslocamentos relativos entre pisos (drifts) do edifício são dependentes nos eixos de referência da estrutura. [9]

Athanatopoulou, em 2005, propôs fórmulas analíticas para a determinação do ângulo crítico de incidência sísmica, isto é, a colocação do ângulo crítico de incidência sísmica que produz a máxima exigência, e o valor máximo correspondente da quantidade de resposta das estruturas considerando tanto duas ou três componentes sísmicas. As fórmulas analíticas desenvolvidas são derivadas assumindo que a estrutura se comporta linearmente. [13]

Rigato e Medina, em 2007, investigaram a resposta de estruturas simétricas e assimétricas com a variação dos períodos naturais de vibração com consideração ao ângulo de incidência sísmico. Eles observaram que o ângulo crítico para uma dada quantidade de resposta varia com o período fundamental, o modelo tipo e o nível do comportamento não elástico. [9]

Além disso, Lagaros, em 2008, investigou a influência do ângulo de incidência nos resultados das várias componentes da análise dinâmica incremental e demonstrou a necessidade de ter em conta a aleatoriedade do ângulo de incidência. [9]

A evidência de sismos passados demonstraram claramente que a irregularidade em planta, que pode ser causada pela distribuição assimétrica da massa, rigidez e força, é uma das mais frequentes fontes de danos severos, desde que causem rotações torsionais do piso localizando a exigência sísmica em pequenas porções do edifício. Em anos passados, grandes esforços em pesquisa foram dedicados para o estudo da resposta sísmica de estruturas irregulares, tanto em planta e em altura. A presença de componentes não estruturais, tais como sistemas de enchimento, influenciou fortemente a rigidez lateral da porção da estrutura na qual eles estão inseridos e eles podem também afetar a regularidade do sistema estrutural. [13]

Reyes e Kalkan, em 2012, examinaram a influência que o ângulo de incidência do movimento do solo tem em vários parâmetros de exigência de engenharia. O estudo focou-se em edifícios tanto simétricos como não simétricos perto de zonas com falhas, nas quais os registos são tipicamente rodados para direções de falhas normais (FN) / falhas paralelas (FP). Descobriu-se que as análises dinâmicas não lineares para movimentos do solo orientados nos eixos de FN/FP podem sobrestimar o valor de pico de deslocamentos medianos nas orientações gerais. Tal sobrestimação foi menos de 20% quando um largo conjunto de movimentos do solo foram adotados. [13]

3.2. ÂNGULO CRÍTICO DE INCIDÊNCIA DO SISMO E A RESPOSTA ESTRUTURAL MÁXIMA

López e Torres [11] tiveram como objetivo principal desenvolver um método simples mas preciso que pode ser aplicado nos códigos dos edifícios para determinar o ângulo crítico e a correspondente resposta estrutural máxima, para o caso geral de três componentes do movimento do solo que podem ter diferentes ou idênticas formas espectrais.

Para tal eles utilizaram a teoria da vibração aleatória de onde obtiveram os momentos espectrais de resposta. Através de formas já anteriormente desenvolvidas por eles chegaram a uma expressão onde se obtém o pico de resposta R em função do ângulo de incidência, tal como demonstra a expressão 3.1.

$$R(\theta) = \left\{ [(R^{1x})^2 + (R^{2y})^2] \cos^2 \theta + [(R^{1y})^2 + (R^{2x})^2] \sin^2 \theta \right. \\ \left. + 2 \sin \theta \cos \theta \left[\sum_i \sum_j C_{ij} R_i^{1x} R_j^{1y} - \sum_i \sum_j C_{ij} R_i^{2y} R_j^{2x} \right] + (R^3)^2 \right\}^{1/2} \quad (3.1)$$

onde:

$R^{1x}, R^{2x}, R^{1y}, R^{2y}, R^3$ – Pico de resposta

$R_i^{1x}, R_j^{2x}, R_i^{1y}, R_j^{2y}$ – Resposta modal

C_{ij} – Coeficiente de correlação

θ – Ângulo de incidência relativamente ao eixo X

A partir da expressão 3.1 eles fizeram a sua derivação de forma a obter o ângulo crítico, obtendo a seguinte expressão:

$$\theta_c = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{2 \sum_i \sum_j C_{ij} [R_i^{2y} R_j^{2x} - R_i^{1x} R_j^{1y}]}{(R^{1y})^2 + (R^{2x})^2 - (R^{1x})^2 - (R^{2y})^2} \right\} \quad (3.2)$$

A expressão 3.2 dá dois valores de ângulo de incidência - θ_c - separados por 90° , que definem os valores máximo e o mínimo do pico de resposta estrutural R . Foi assim que eles souberam que o ângulo crítico da estrutura não depende da componente de resposta vertical, logo não depende do espectro vertical.

Assim eles propuseram um método de análise para determinar a resposta crítica. Para tal eles fizeram uma lista dos passos a realizar:

- Resolver os cinco casos de carregamento sísmico para obter as respostas modais $R_i^{1x}, R_i^{1y}, R_i^{2x}, R_i^{2y}$ e R_i^3 , e os picos de resposta $R^{1x}, R^{1y}, R^{2x}, R^{2y}$ e R^3 ;
- Determinar os dois valores críticos obtidos pela expressão 3.2;
- Para cada um dos dois ângulos obtidos, determinar o pico de resposta utilizando a expressão 3.1. O maior valor é o pico de resposta máximo para todos os ângulos de incidência possíveis, pois cada valor de resposta pode ter um ângulo crítico diferente e assim o método deve ser aplicado para cada valor de resposta desejado. [11]

Através das suas pesquisas eles concluíram que o método proposto para calcular o ângulo crítico de incidência do movimento do solo e a resposta estrutural crítica para dois espectros horizontal e vertical arbitrários, requerem apenas a solução de cinco casos básicos de carga sísmica, definidos quando o espectro é aplicado ao longo de três direções de referência da estrutura: Duas análises correspondentes a cada espectro horizontal e uma para o espectro vertical. Se houvesse apenas uma componente sísmica horizontal ou se dois espectros horizontais tenham formas idênticas, apenas três casos de carga são necessários, dois com o espectro horizontal e um com o espectro vertical. A diferença básica ao apresentado em [2] para um espectro horizontal com forma idêntica, é que as fórmulas para os ângulos críticos e o pico de resposta são derivados usando uma abordagem mais simples baseado em técnicas aceitáveis de análise sísmica: regra CQC para combinar respostas modais e regra SRSS para combinar respostas para as principais componentes do movimento do solo. [11]

O método é preciso e a sua aplicação foi ilustrada através de meios de análise dinâmica de edifícios assimétricos. O método pode ser facilmente aplicado em programas informáticos existentes para aplicações práticas e incluído em regulamentos sísmicos para o cálculo de estruturas assimétricas onde estes efeitos são significantes.

A direção crítica das componentes do movimento sísmico horizontal é definida como a direção com o valor máximo da resposta estrutural, depende dos dois espectros horizontais e depende também do parâmetro da resposta estrutural analisada; isso não depende do espectro vertical. Para o caso prático de dois espectros horizontais com formas idênticas e com um espectro vertical arbitrário, o ângulo crítico

não depende do rácio espectral de duas componentes horizontais nem do espectro vertical; neste caso o ângulo crítico é o mesmo quer seja uma ou duas as componentes sísmicas horizontais aplicadas.

Para o caso especial de espectros idênticos em ambas as direções horizontais, a resposta estrutural máxima não varia com o ângulo de incidência, isto é, qualquer direção é uma direção crítica. Este valor de resposta é um limite superior para todas as respostas estruturais possíveis devido a qualquer combinação de rácios espectrais e ângulos de incidência. Isto veio como uma aplicação no cálculo sísmico; um critério do cálculo conservativo vai ser para analisar a estrutura com o mesmo espectro horizontal aplicado simultaneamente com as duas direções horizontais da referência estrutural, e o espectro vertical.

3.3. ORIENTAÇÃO CRÍTICA DE TRÊS DIREÇÕES SÍSMICAS CORRELACIONADAS

Athanatopoulou [7] teve como objetivo determinar o ângulo crítico de incidência e a resposta máxima associada para o caso geral de três componentes sísmicas correlacionadas sem o uso da suposição do modelo de Penzien-Watabe. Isto é, as três componentes sísmicas transacionais podem ter qualquer grau de correlação e não necessariamente correlações de funções de valor nulo. Neste caso a aplicação do método do espectro de resposta não é possível e daqui é usado o método da análise ao longo do tempo.

Através do seu estudo Athanatopoulou [7] utilizou as fórmulas analíticas para determinar tanto o ângulo crítico de incidência como os valores máximos e mínimos associados de qualquer quantidade de resposta, devido ao desenvolvimento de três componentes sísmicas correlacionadas sem o uso do modelo de Penzien-Watabe. Estas fórmulas são simples e requerem a solução de três diferentes casos de carga históricos: dois (bidirecional) para as componentes horizontais e uma (unidirecional) para a componente vertical do movimento do solo.

As fórmulas sugeridas são verificadas por meios da análise ao longo do tempo de um edifício assimétrico com vários pisos devido a três diferentes registos sísmicos. Através da análise de resultados as conclusões foram as seguintes:

- O mesmo registo sísmico tem diferentes ângulos críticos para diferentes quantidades de resposta;
- Diferentes registos sísmicos têm ângulos críticos diferentes para a mesma quantidade de resposta. [7]

Para o edifício examinado e os registos sísmicos utilizadas as seguintes conclusões foram retiradas:

- O valor crítico para a quantidade de resposta pode ser até 80% superior do que a resposta produzida quando as componentes sísmicas estão aplicadas ao longo dos eixos da estrutura;
- A variação máxima relativa da quantidade de resposta R pode ser até 200% no intervalo (0-180) do ângulo sísmico de incidência. [7]

Os resultados acima são mais desfavoráveis do que aqueles que apareceram quando foi usado o método de Penzien-Watabe.

3.4. AVALIAÇÃO DA RESPOSTA CRÍTICA E DO ÂNGULO CRÍTICO DE INCIDÊNCIA COM O RSA E RHA

Marinilli e Lopez [14] tiveram como objetivo comparar o ângulo crítico de incidência e as respostas máximas críticas obtidas com a análise de resposta ao longo do tempo (RHA) e a análise para o espectro de resposta (RSA).

As respostas críticas (R_{RHA}) e o ângulo de incidência crítico correspondente (θ_{RHA}) foram obtidos pela integração no tempo da resposta estrutural. Os resultados RHA de cada estrutura foram obtidos variando sistematicamente o ângulo de incidência para cada movimento do solo, entre os 0° e 180° face ao eixo X, com incrementos de 10° . Os ângulos de incidência de 45° e 135° foram também considerados. As análises foram realizadas através de um software computacional SAP2000. [14]

Os ângulos críticos (θ_{RSA}) foram obtidos utilizando a expressão 3.2, deduzida por Torres e López. De seguida foi utilizada a expressão 3.1, também deduzida por Torres e López, onde foram calculados as respostas críticas (R_{RSA}). [14]

Os resultados que obtiveram mostraram que o RSA é adequado para estimar as respostas críticas e os correspondentes ângulos críticos de incidência para fins de projeto. Para obter mais valores refinados das respostas críticas pode ser usando o RHA num curto intervalo de ângulos de incidência que é dado pelos resultados do RSA assim reduzindo as computações numéricas necessárias. [14]

3.5. ESTUDO DO EFEITO DO ÂNGULO DE EXCITAÇÃO DO SISMO NAS FORÇAS INTERNAS DE ELEMENTOS DE EDIFÍCIOS METÁLICOS USANDO ANÁLISES NÃO LINEARES AO LONGO DO TEMPO

Em pesquisas anteriores a consideração do efeito do ângulo de excitação está principalmente limitado a edifícios com comportamento elástico. Hosseini e Salemi [10] utilizaram dois conjuntos de edifícios em aço de 5 pisos, um conjunto com plano quadrado e o outro com plano retangular. Ambos foram projetados com base no regulamento do projeto sísmico para edifícios em aço e depois foram analisados por um programa de análise ao longo do tempo não linear usando simultaneamente os acelerogramas de duas componentes horizontais de alguns sismos. Foi dado um conjunto de valores de 0° a 90° relativamente ao eixo X, com um incremento de 10° para o ângulo de excitação.

Após o estudo e baseado em resultados numéricos Hosseini e Salemi concluíram que:

- As forças internas dos elementos estruturais dependem do ângulo de incidência da onda sísmica com respeito aos eixos do plano do edifício.
- Entre várias forças internas dos elementos, as forças axiais dos pilares são mais sensíveis ao ângulo de incidência.
- As forças axiais dos pilares podem exceder os casos normais até 50% através da variação do ângulo de incidência, e esta variação é maior em edifícios retangulares em planta do que os quadrados em planta.
- O valor máximo do momento fletor nos pilares ocorre principalmente pelo ângulo de incidência tanto de 0 ou 90 graus, contudo, para alguns sismos pode ocorrer por outro ângulo.
- A diferença entre os momentos máximos devida a vários ângulos de incidência é mais notório em edifícios retangulares em planta e pode chegar aos 60%.
- A força de corte na base dos edifícios devido aos vários ângulos de incidência podem diferir até 10%.
- Cada força interna dos pilares obtém o seu valor máximo com um específico ângulo de excitação que não é necessariamente 0 ou 90, e é diferente de pilar para pilar, e esse ângulo específico não é o mesmo para sismos diferentes.
- Não existe um ângulo de incidência específico para cada edifício que maximiza as forças internas de todos os elementos estruturais em conjunto, e cada membro obtém o valor máximo de

cada das suas forças internas por um ângulo de incidência específico. Este ângulo não é o mesmo para vários sismos.

- O estudo em causa foi limitado a edifícios regularmente simétricos, e parece que a variação das forças internas pela variação do ângulo de incidência tornam-se muito maiores em edifícios irregulares e assimétricos. [10]

3.6. EFEITO DO ÂNGULO SÍSMICO DE INCIDÊNCIA NA RESPOSTA ESTRUTURAL SOB REGISTOS BIDI-RECCIONAIS E MOVIMENTOS DO SOLO ARTIFICIAIS

Tsourekas *et al.* [20] tiveram como objetivo investigar a influência da orientação das componentes do movimento do solo horizontal na resposta estrutural no contexto de análise de resposta histórica linear e descobrir as diferenças, caso existam, entre efeitos provocados por movimentos dos solos registados e artificiais.

Com isto eles baseando-se nos resultados retiraram as seguintes conclusões, que podem ser escritas com respeito aos edifícios investigados e os pares de acelerogramas usados:

- A influência do ângulo sísmico de incidência nas quantidades de resposta é significativo tanto para os acelerogramas registados como para os artificiais. Sob o movimento do solo do sismo real a resposta pode variar até 240% e para os acelerogramas artificiais até 302%.
- É importante notar que para edifícios de um piso simétricos e sem massa excêntrica, o ângulo sísmico de incidência, respetivo ao período natural do edifício ou para a excentricidade da massa, não é detetada nenhuma tendência específica (sob ou sobrestimação da resposta).
- A resposta produzida quando as componentes não correlacionadas do movimento do solo são aplicadas ao longo dos eixos estruturais é menor que a resposta máxima para o ângulo sísmico de incidência crítico, e nestes casos também menor que a resposta produzida quando as componentes correlacionadas do movimento do solo são aplicadas ao longo dos eixos estruturais. Isto é válido mesmo em edifícios simétricos.
- Quando o mesmo acelerograma artificial é usado para ambas as componentes do movimento do solo, a resposta máxima para o ângulo sísmico de incidência crítico é muito maior que a resposta produzida por acelerogramas aplicados ao longo dos eixos estruturais. Contudo isto não é verdade no caso de acelerogramas registados.
- Considerando as várias incertezas inerentes ao projeto de estruturas face ao sismo na vida real, parece que a divergência da resposta detetada não é significativa quando se aplica acelerogramas ao longo dos eixos estruturais. Contudo, independentemente de qualquer avaliação da importância de tais divergências, estas podem ser facilmente eliminadas usando fórmulas analíticas que permitem a precisão computacional da resposta máxima. Estas fórmulas são simples e a sua codificação num programa computacional é direta. [20]

3.7. O EFEITO DO ÂNGULO SÍSMICO DE INCIDÊNCIA NA EXIGÊNCIA SÍSMICA DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

Cantagallo *et al.* [8] tiveram como objetivo investigar a importância do ângulo de incidência do movimento do solo analisando a análise ao longo do tempo não linear de quatro estruturas simétricas e assi-

métricas sujeitas a duas componentes horizontais simultâneas não correlacionadas de várias componentes do movimento do solo. Cada registo do movimento do solo foi aplicado com diferentes ângulos de incidência variando entre 0 e 180 graus com incrementos de 22,5 graus.

Com este estudo fizeram uma análise não linear ao longo do tempo às estruturas. As componentes do movimento do solo usadas consistem em registos tanto escalares como não escalares com duas componentes horizontais não correlacionadas. Os resultados principais obtidos foram:

- A exigência estrutural numa estrutura duplamente simétrica de 1 andar de betão armado não varia significativamente como uma função do ângulo de incidência. Reciprocamente, o rácio máximo do deslocamento relativo entre andares para um plano assimétrico de estruturas de betão armado varia consideravelmente dependendo do ângulo de incidência. Mais especificamente, o rácio máximo do efeito da orientação $r(\theta_i)$ obtido através de um movimento do solo não escalar mostra diferenças significativas entre o Parâmetro de Exigência de Engenharia de cálculo aplicando as componentes sísmicas ao longo de diferentes ângulos de incidência. Este comportamento é devido ao facto dos edifícios irregulares em planta tenderem a ter significantes diferenças na rigidez e capacidade em diferentes direções. O movimento do solo aplicado gera a maior exigência quando aplicada na maioria das direções flexíveis.
- Correlações entre a energia contida nos elementos, medida pela Densidade de Energia Específica (DEE), de 61 registos não escalares e o Rácio Máximo de Deslocamento Relativo Entre Andares (RMDREA), obtidos aplicando diferentes movimentos do solo em diferentes ângulos de incidência, mostram que a exigência nas estruturas irregulares em planta é bem correlacionada com a Densidade de Energia Específica do movimento do solo. Registos de energia elevada contida tendem a produzir elevados RMDREA(θ) quando eles são aplicados ao longo da direção mais flexível da estrutura. Para estruturas regulares esta tendência não é visível porque o seu comportamento, em termos de flexibilidade e força, não varia significativamente ao longo de diferentes direções.
- As Análises Não Lineares ao Longo do Tempo (ANLLT) realizadas com os conjuntos de acelerogramas de espectros de escala compatível confirmaram que o registo do movimento do solo aplicado em estruturas irregulares produzem diferentes Densidades de Energia Específica dependendo no seu ângulo de incidência. Os maiores valores de RMDREA(θ) e $r(\theta_i)$ são ambos obtidos quando os movimentos do solo são aplicados na maioria das estruturas irregulares. Os valores de $r(\theta_i)$ mostram que os efeitos direcionais gerados pelos registos de espectros de escala compatível são em geral menores do que os outros obtidos para registos não escalares.
- Os resultados deste estudo aplicam-se mais especificamente a edifícios existentes, que oferecem planos (e alturas) irregulares, com rigidez e robustez que podem variar significativamente de acordo com a direção da carga considerada. Nestes casos, as Análises Não Lineares Históricas ao Longo do Tempo realizadas pela aplicação dos registos do movimento do solo ao longo dos eixos principais podem substancialmente subestimar a previsão da exigência estrutural. Dado que não é possível saber *a priori* a direção de incidência que vai gerar as maiores exigências, é necessário efetuar as Análises Não Lineares ao Longo do Tempo para diferentes ângulos de incidência. [8]

3.8. ALGUNS PROBLEMAS RELACIONADOS COM A RESPOSTA NÃO ELÁSTICA DE EDIFÍCIOS SOB EXCITAÇÃO BIDIRECIONAL

Fontara *et al.* [9] tiveram como objetivo investigar a influência do ângulo sísmico de incidência no índice de dano de um edifício assimétrico de um andar considerando como registo um par de acelerogramas não correlacionados e completamente correlacionados. Além disso, a influência do nível de intensidade sísmica em respostas estruturais não elásticas sobre todos os ângulos sísmicos de incidência foi investigada. Foram realizadas análises dinâmicas não lineares, usando dez movimentos do solo bidirecionais para vários ângulos sísmicos de incidência e quatro níveis de intensidade sísmica, e foi computadorizado o índice de destruição da estrutura.

Com isto, os movimentos do solo são representados por: a) registos de acelerogramas correlacionados, b) o correspondente acelerograma não correlacionado e c) os acelerogramas completamente correlacionados. Para o edifício examinado retiraram as seguintes conclusões:

- O espectro de resposta obtido pelo registo, os acelerogramas não correlacionados e completamente correlacionados correspondentes ao mesmo movimento do solo, são diferentes. Portanto os fatores de escala determinados pelo registo são diferentes, para os acelerogramas não correlacionados e completamente correlacionados para a mesma excitação.
- A resposta sísmica não elástica depende do ângulo sísmico incidente tal como a orientação dos eixos de referência do movimento do solo.
- O valor máximo do índice geral dos danos estruturais não ocorre quando os acelerogramas atuam ao longo dos eixos estruturais.
- O ângulo de incidência que causa o valor máximo do índice geral de danos varia com o nível de intensidade do movimento do solo.
- Os três pares individuais da mesma excitação registada, não correlacionada e completamente correlacionada, podem causar diferentes níveis de danos estruturais para o ângulo crítico de incidência sísmico.
- Qualquer par individual de acelerogramas registado, não correlacionada e completamente correlacionada, tem o potencial de maximizar o índice geral dos danos estruturais. Isto é verdade não apenas para diferentes movimentos do solo mas também para diferentes níveis de intensidade do mesmo movimento do solo. [9]

3.9. INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DO SISMO NA RESPOSTA SÍSMICA DE PLANOS ASSIMÉTRICOS EM EDIFÍCIOS DE BETÃO ARMADO

Magliulo *et al.* [13] analisaram o comportamento sísmico de três edifícios de betão armado tipicamente Italianos, tanto regulares e irregulares em planta, com métodos analíticos não lineares diferentes, de modo a avaliar as diferenças, se alguma, entre as metodologias analíticas. Em particular, os resultados das análises dinâmicas não lineares, análises não lineares estáticas com padrão de cargas “modais” e análises estáticas não lineares com padrão de cargas “uniformes” foram comparadas. Além disso, a influência do ângulo de incidência da ação sísmica foi também investigada pela realização de doze análises dinâmicas não lineares, rodando a direção das componentes ortogonais em 30° para cada análise (de 0° a 330°).

As análises foram realizadas tanto no Estado Limite de Dano Significativo, assumindo como referência o espectro elástico do EC8 caracterizado por um período de retorno de 475 anos, correspondente a 10%

de probabilidade de ser excedido em 50 anos, e no Estado Limite de Colapso Eminente, caracterizado por um período de retorno de 2475 anos, assumindo como referência o mesmo espectro amplificado por um fator igual a 1,5. [13]

Os resultados das metodologias analíticas não lineares foram comparadas em termos de rácio entre a rotação requerida e a capacidade no topo e no fundo de cada pilar em duas direções, e de deslocamentos da cobertura. Algumas observações na influência do ângulo de incidência da ação sísmica também foram feitas e elas focam-se na avaliação de um ângulo crítico para o qual a exigência sísmica alcança os valores máximos. [13]

Neste estudo, os métodos de análise não linear (estáticos e dinâmicos), de acordo com o EC8, foram comparados considerando três diferentes edifícios de betão armado que são representativos de edifícios de betão armado tipicamente Italianos: um em planta em forma de retângulo, um em planta em forma de L e um em planta em forma de retângulo com um pátio. [13]

Por comparação a avaliação realizada com análises simples e dinâmicas, descobriram que a análise não linear estática é mais conservativa, isto é, produz fatores de segurança mais pequenos respetivamente às análises dinâmicas não lineares para níveis de intensidade sísmica mais elevadas. Esta conclusão é invertida, isto é, as análises dinâmicas não lineares produzem fatores de segurança mais baixos para níveis de intensidade sísmica baixa. [13]

O edifício nº2 é irregular em planta de acordo com as regras do EC8. A influência do ângulo de incidência na exigência é avaliada de modo a explorar melhor o desempenho sísmico desta estrutura, que exhibe um comportamento dinâmico não usual. Doze direções de sismos diferentes foram consideradas, rodando a direção das componentes ortogonais dos acelerogramas selecionados em 30 graus para cada análise (de 0° a 330°). [13]

Os resultados mostraram que a introdução do ângulo de incidência da ação sísmica influencia significativamente a resposta de estruturas de betão armado; o ângulo crítico sísmico fornece um aumento na exigência maior que 15% em ambos os deslocamentos e no rácio R entre a rotação requerida e a capacidade. A sobrestimação das análises dinâmicas de códigos compatíveis podem ir até 37% se a variação do ângulo de incidência não é tida em conta. Se as rotações nas rótulas plásticas são consideradas, a discrepância devida ao ângulo de incidência do sismo pode ir até 30%; por esta razão, tal ângulo crítico deve ser tido em conta na análise estrutural sísmica. O ângulo crítico de incidência depende em ambos os parâmetros de exigência de engenharia, como exemplo deslocamentos ou rotações de rótulas plásticas, e na intensidade da entrada sísmica. Este problema indica claramente uma grande incerteza relativamente à definição de um ângulo crítico de incidência. O coeficiente de variação dos deslocamentos de topo requeridos vai de 0,06 a 0,13, enquanto a variação do coeficiente do rácio R entre a rotação requerida e a capacidade vai de 0,07 a 0,10. [13]

Este estudo provou a influência significativa do ângulo de incidência sísmica numa estrutura assimétrica em planta. Tal influência não está incluída correntemente nos códigos de edifícios; a exigência sísmica pode ser significativamente sobrestimada mesmo quando análises dinâmicas não lineares de um regulamento compatível são usadas. Um estudo paramétrico mais amplo é necessário de modo a incluir a influência do ângulo de incidência sísmico em códigos de edifícios correntes. [13]

3.10. INVESTIGAÇÃO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA SÍSMICO CRÍTICO PARA ANÁLISES DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

Quadri e Madhurin [18] fizeram um estudo em que um edifício de betão armado de 4, quadrado em planta, foi analisado pelo método de análise estática equivalente. Um conjunto de valores de 0 a 90 graus, com um incremento de 10 graus, foi usado para o ângulo de excitação da força sísmica.

Com isto, eles concluíram que:

- A força axial para todos os cantos dos pilares excede o caso comum até 13%, que leva a que o ângulo de incidência sísmico seja 49 graus.
- Os valores críticos dos momentos fletores e esforço transversal são obtidos variando o ângulo de incidência sísmica até 10 graus.
- Não há um único ângulo de incidência específico para cada estrutura que aumenta o valor das forças internas de todos os elementos estruturais juntos; cada elemento obtém o seu valor máximo das forças internas por um ângulo de incidência específico. [18]

3.11. ASPETOS PRINCIPAIS

Após a análise de vários artigos referentes a componentes importantes para a presente dissertação, foi possível sintetizar e retirar os seguintes aspetos principais de cada artigo:

- O método, proposto por López e Torres [11], para calcular o ângulo crítico de incidência e resposta estrutural, requer apenas cinco casos básicos de carga sísmica;
- Segundo Athanatopoulou [7], o valor crítico da resposta pode ser até 80% superior do que a resposta produzida quando as componentes sísmicas estão aplicadas nos eixos da estrutura;
- Marinilli e López [14] mostraram que o RSA é adequado para estimar as respostas críticas e os respetivos ângulos críticos de incidência para fins de projeto;
- Para Hosseini e Salemi [10] os resultados obtidos mostraram que entre os vários esforços existentes nos elementos estruturais, são as forças axiais nos pilares que são mais sensíveis ao ângulo de incidência;
- Foi Tsourekas *et al.* [20] que observou que a influência do ângulo de incidência sísmica na quantidade de resposta é significativa tanto para os acelerogramas que são registados como para os artificiais;
- Cantagallo *et al.* [8] obtiveram resultados que mostraram que a exigência numa estrutura duplamente simétrica não varia significativamente em função do ângulo de incidência, contudo numa estrutura assimétrica já pode variar consideravelmente o ângulo de incidência;
- Fontara *et al.* [9] notaram que a resposta sísmica não elástica depende do ângulo de incidência sísmica tal como a orientação dos eixos de referência da ação sísmica, e que o valor máximo da resposta estrutural não ocorre quando os acelerogramas estão aplicados nos eixos estruturais;
- Com o estudo de Magliulo *et al.* [13] provou-se a influência significativa do ângulo de incidência sísmica numa estrutura assimétrica em planta, e tal influência não está correntemente presente nos regulamentos de edifícios;
- Quadri e Madhurin [18] concluíram que os valores críticos dos momentos fletores e esforço transversal são obtidos variando o ângulo de incidência sísmica até 10°.

4

CASOS DE ESTUDO ANALISADOS

4.1. CONFIGURAÇÃO ESTRUTURAL

Na presente dissertação foram utilizados dois tipos de estruturas, um com apenas um andar e outro com cinco andares. Ambos os tipos apresentam uma configuração em planta quadrada (4x4 m), ou seja, simétrica para se proceder a uma análise mais fácil das estruturas e uma altura por andar de 3 metros, sendo este um valor comum nas habitações correntes.

Com estas configurações acima referidas foram ainda acrescentados outros fatores tais como, a diferenciação dos pilares para cada tipo de estrutura. Neste caso as estruturas eram compostas por quatro pilares, como mostra a Fig. 4.1, um em cada canto da estrutura, e estes variaram nas suas dimensões levando a que se obtivessem estruturas do tipo:

- Quatro pilares $A=B=C=D= 30 \times 30$ (cm) – estrutura simétrica nas duas direções com rigidez igual nas duas direções
- Quatro pilares $A=B=C=D= 30 \times 60$ (dy X dx) (cm) – estrutura simétrica nas duas direções, mas agora com rigidez diferente em cada direção
- Dois pilares $A=D= 30 \times 30$ e dois $B=C=30 \times 60$ (dy X dx) (cm) – estrutura simétrica apenas numa direção
- Três pilares $A=C=D= 30 \times 30$ e um $B= 60 \times 60$ (cm) – estrutura assimétrica

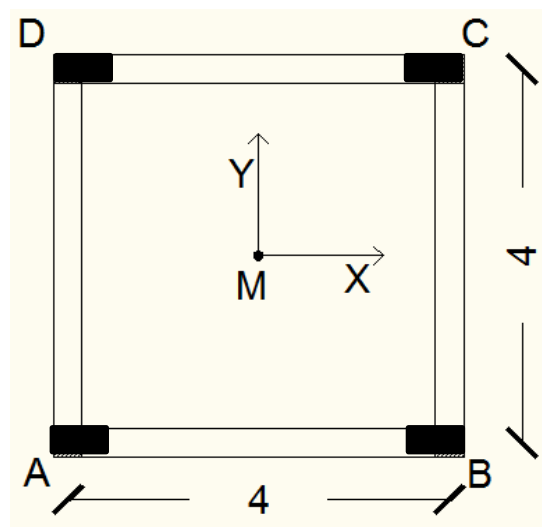


Fig. 4.1 - Vista em planta da estrutura

As vigas utilizadas têm como dimensões 30x50 (cm) e a espessura das lajes é de 0,12 m. Com estas configurações pretendeu-se obter estruturas simples de modo a poder facilitar a análise dos resultados obtidos.

Ao longo desta dissertação sempre que é mencionado o tipo de estrutura através de i), ii), iii) e iv) refere-se à tipologia de pilares e disposição dos mesmos como foi supradito anteriormente.

4.2. PARÂMETROS

Todos os parâmetros foram escolhidos de forma a estarem o mais parecido possível com a realidade, podendo estas serem analisadas de forma idêntica a estruturas reais. Os parâmetros utilizados foram os seguintes:

- $E = 29 \text{ GPa}$ (Módulo de Elasticidade) – equivalente a um betão C16/20
- $\nu = 0,2$ (Coeficiente de Poisson) – valor correntemente usado para o betão
- Laje com comportamento de um diafragma no seu plano e o centro de massa encontra-se no centro da laje
- Os pilares não têm deformação axial, $A_{\text{pilares}} \approx \text{infinito}$
- Espectro de Resposta elástico do EC8: Tipo II, Zona 3, Tipo do Solo B, Fator de Amortecimento $\eta=1$ ($\xi=5\%$)

Para o caso de estudo foram consideradas as seguintes cargas verticais:

- BA: 25 kN/m^3 para as vigas e laje (G)
- Ignorado o peso próprio dos pilares
- Carga permanente: $1,5 \text{ kN/m}^2$ (G)
- Sobrecarga: 3 kN/m^2 (Q)
- Combinação sísmica: $G + 0,3Q$ – segundo o EC8

As estruturas foram analisadas para a carga sísmica pelos seguintes métodos:


- 1) Análise Estática Linear para distribuições triangulares e uniformes das forças laterais
- 2) Análise Linear ao Longo do Tempo com 4 acelerogramas


Ambas as análises, estática e dinâmica, foram colocadas para vários ângulos de incidência, entre 0° e 360° com intervalos de 10° . Estas análises foram também feitas em separado tanto considerando ou não a carga vertical, com o objetivo de ver a influência da carga vertical relativamente ao ângulo crítico de incidência.

Para o caso 1) foi necessário calcular as forças estáticas, para isso utilizou-se as fórmulas presentes no EC8 no capítulo 4.3.3.2.2 - para o cálculo da força de corte na base, F_b (expressão 2.3) – e 4.3.3.2.3 – para o cálculo da distribuição das forças sísmicas, F_i (expressão 2.4).

Para o cálculo da força de corte na base foi necessário primeiro calcular o valor de cálculo do espectro de resposta elástico horizontal que se encontra no capítulo 3.2.2.2 do EC8. A seguinte tabela mostra que valores foram usados para o cálculo do espectro de resposta:

Tabela 1 - Informação Zona Sísmica

Tipo II		$a_{gR} =$	1,7	m/s ²
Zona 3				

(EC8 - pág. 211 - Tabela NA-3.3)					
Solo tipo B		S	T _B (s)	T _C (s)	T _D (s)
		1,35	0,05	0,25	2

$\eta =$	1	$\xi =$	5	%
----------	---	---------	---	---

Já com esta informação, foi ainda necessário recorrer ao programa computacional SAP2000 para se retirar as frequências angulares, onde de seguida se procedeu ao cálculo das forças sísmicas estáticas para cada estrutura. A tabela abaixo representada mostra o valor das forças estáticas finais calculadas referentes a uma das estruturas, sendo que as restantes encontram-se em anexo:

Tabela 2 - Forças Estáticas Lineares - Estrutura de 1 Andar com configuração i)

Modo	Direção	T (s)	w (rad/s)	w² (rad²/s²)	S_e (m/s²)	F_b (kN)
1	UX	0,14089	44,596	1988,838	5,738	85,62
2	UY	0,14089	44,596	1988,838	5,738	85,62

No caso de um andar a força basal vai ser igual à força distribuída, logo nas estruturas de um andar apenas há um tipo de forças estáticas lineares, enquanto no caso das estruturas de cinco andares já vai ter dois casos de forças estáticas lineares, uma distribuída triangularmente e outra uniformemente. A carga estática aplicada em cada estrutura foi a que apresenta maior força na base, F_b , entre os dois modos de vibração apresentados, sendo esta distribuída devidamente para cada caso.

Para o caso 2) foram utilizados 4 acelerogramas artificiais que sofreram uma redução em 25% dos valores originais devido aos baixos valores dos períodos apresentados pelas estruturas.

Dos acelerogramas foram retirados os respetivos espetros de resposta, em termos de deslocamentos, e foram também colocados os dois primeiros períodos de cada estrutura para ter uma estimativa dos valores de deslocamento que se iriam obter para cada estrutura. Mais à frente está representado um espetro de deslocamento dos acelerogramas (Fig. 4.2) e também mais em pormenor os acelerogramas e os períodos de vibração referentes aos dois primeiros modos de vibração de cada estrutura, sendo que os traços verticais menores representam os períodos das estruturas de um andar enquanto os traços verticais maiores representam os períodos das estruturas de cinco andares (Fig. 4.3).

Com os acelerogramas pode-se verificar que as estruturas com uma andar têm valores de período de vibração mais baixos do que os valores das estruturas com cinco andares, como já era de esperar.

Como se pode constatar os valores para as estruturas de um andar são idênticos para qualquer acelerograma, pois os períodos destas estruturas são muito baixos. Para as estruturas com cinco andares os valores tiveram algumas variações, mas mesmo assim são muito semelhantes entre os acelerogramas.

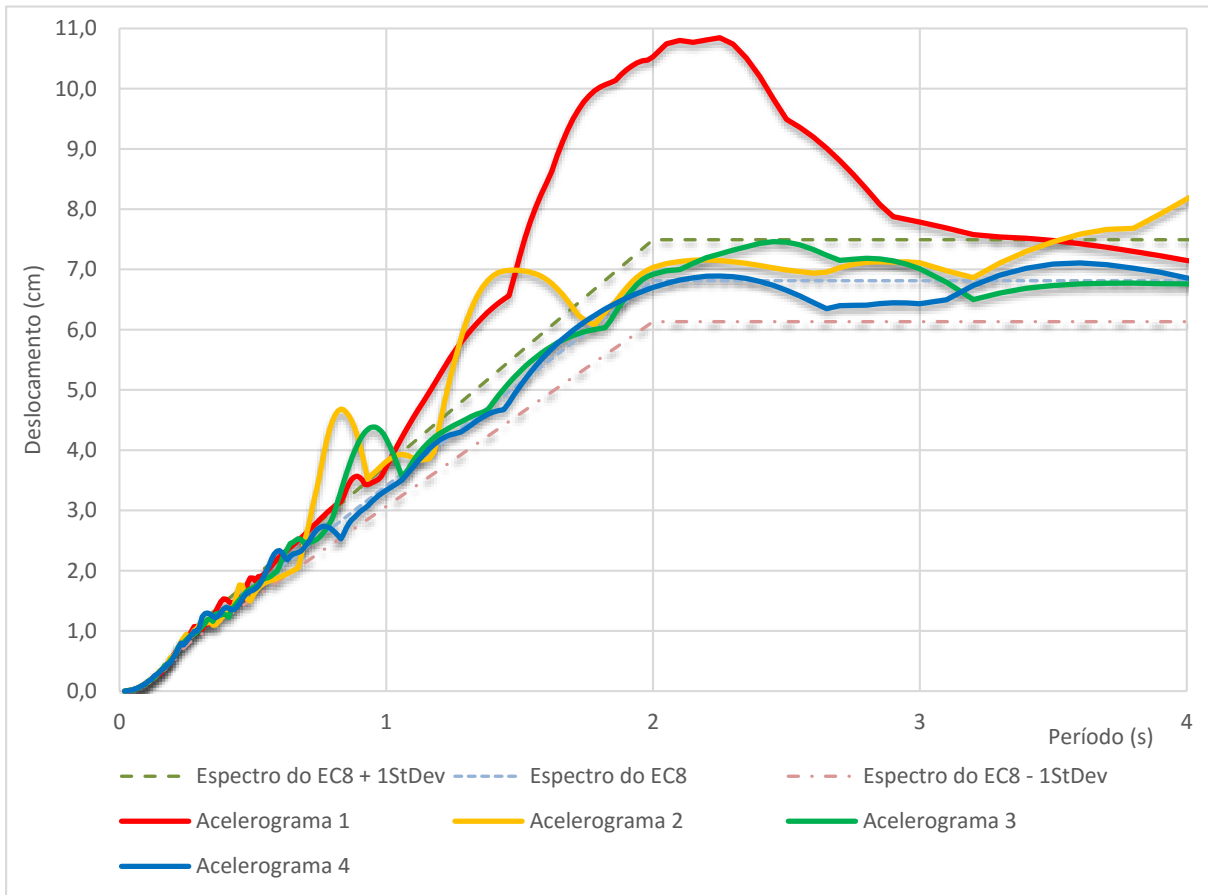


Fig. 4.2 - Espectros de deslocamento

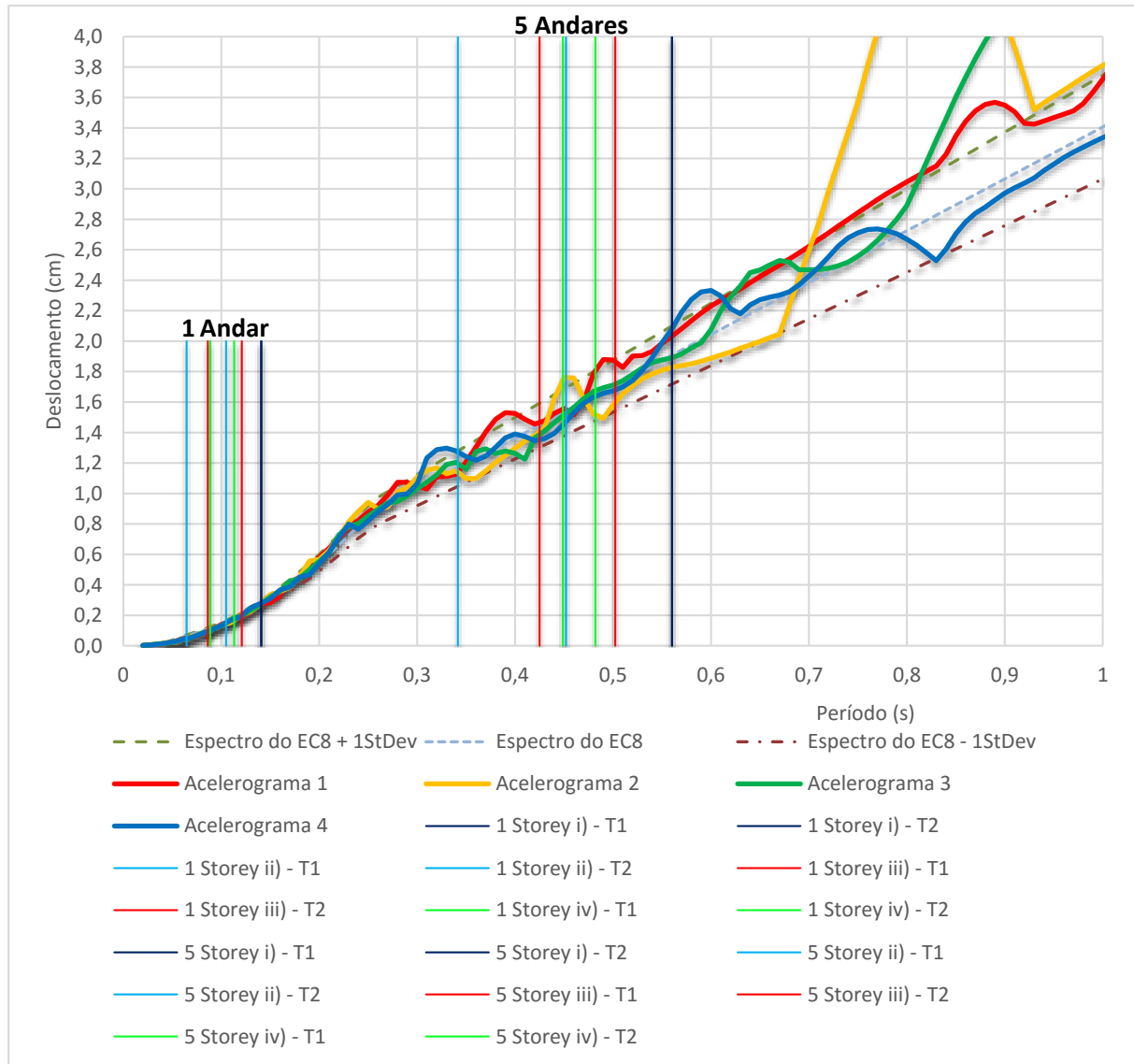


Fig. 4.3 - Espectros de deslocamento e Períodos estruturais

De seguida são representados os respetivos espectros de aceleração dos acelerosogramas, onde se pode constatar que os acelerosogramas utilizados estão dentro dos limites do EC8 (Fig. 4.4). É também representado um gráfico onde mostra em que zona dos espectros se encontra cada estrutura através dos dois primeiros períodos dos modos de vibração, estando estes representados com traços verticais, onde os mais compridos representam as estruturas com um andar enquanto os mais curtos representam as estruturas de cinco andares (Fig. 4.5).

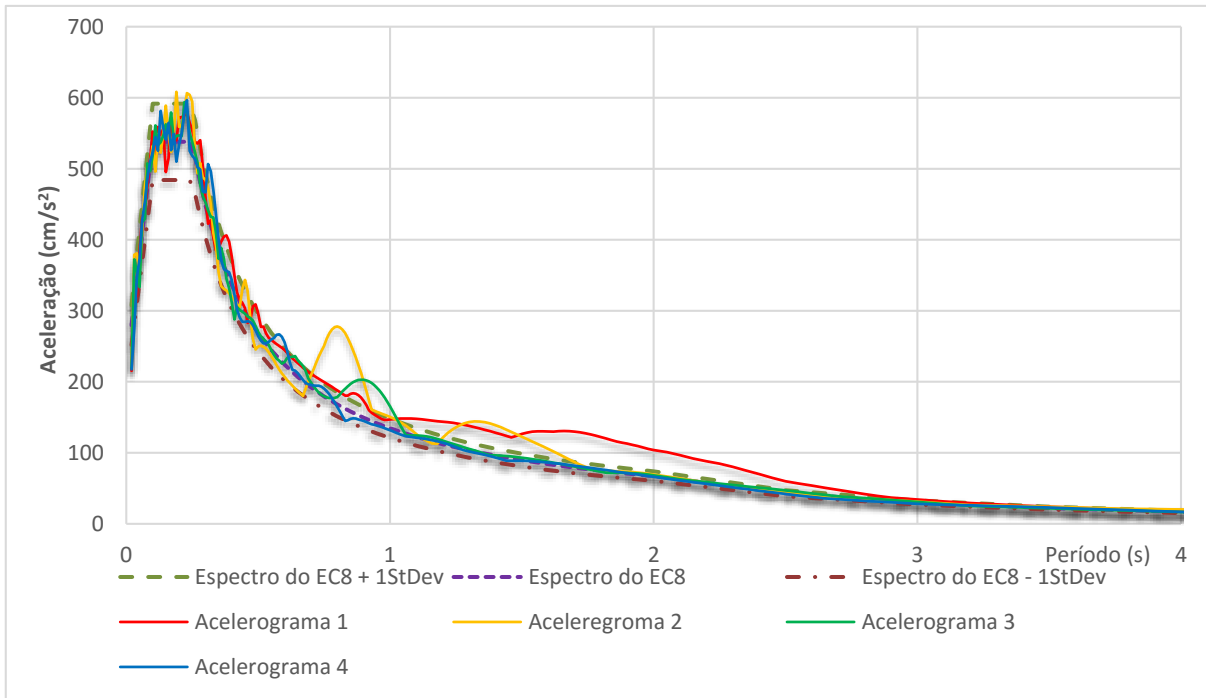


Fig. 4.4 - Espectros de aceleração

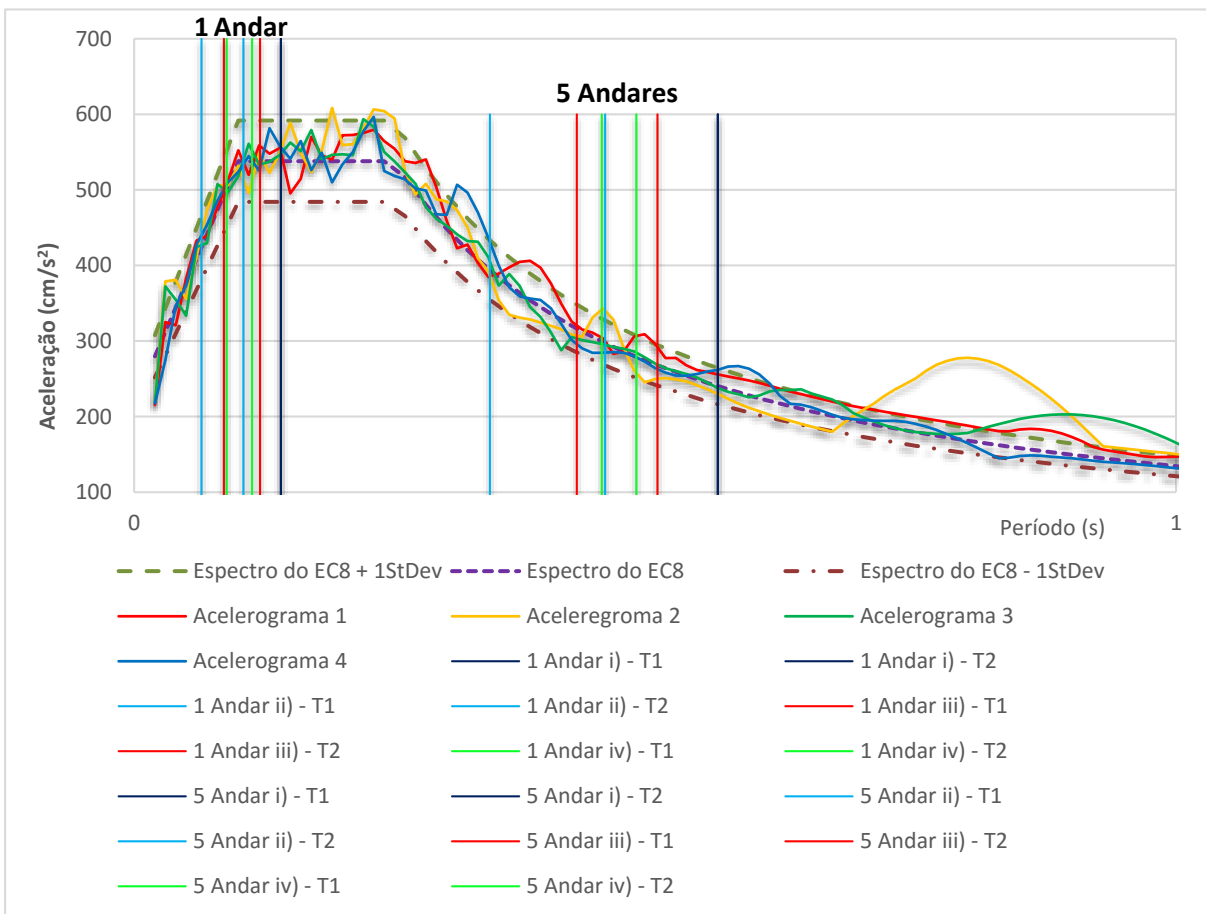


Fig. 4.5 - Espectros de aceleração e Períodos das estruturas

Nas legendas das figuras 4.3 e 4.5 quando se refere a i), ii), iii) e iv) tem como significado a tipologia de estrutura, como foi referido no início deste capítulo. Quanto ao T1 e T2 refere-se aos períodos dos dois primeiros modos de vibração das estruturas, sendo em algumas situações iguais e noutras diferentes. A tabela 3, abaixo representada, mostra a média dos valores entre acelerogramas, tanto para os deslocamentos como para as acelerações, para cada tipo de estrutura e para cada período da estrutura, T1 e T2.

Tabela 3 - Valores médios dos acelerogramas

Estrutura	Deslocamento (cm)		Aceleração (cm/s ²)	
	T1	T2	T1	T2
1 Andar i)	0,30	0,30	550	550
1 Andar ii)	0,18	0,02	540	430
1 Andar iii)	0,20	0,10	540	500
1 Andar iv)	0,19	0,10	540	500
5 Andares i)	1,95	1,95	250	250
5 Andares ii)	1,55	1,20	300	400
5 Andares iii)	1,70	1,40	280	310
5 Andares iv)	1,65	1,55	290	300

4.3. MODELOS

Um modelo computacional de uma estrutura 3D pode ser feito com plantas irregulares, recuos em altura ou mesmo com andares frágeis, que não cria qualquer dificuldade na sua conceção. Este modelo deve ser desenvolvido numa fase inicial do projeto porque pode ser usado para o estudo do comportamento da estrutura para situações de carregamentos verticais e de vento estáticos, tal como para carregamentos sísmicos dinâmicos, com a informação obtida a estrutura pode ser melhorada para resistir melhor aos sismos.

Se para a fase inicial forem feitas modificações e melhorias, é possível que a estrutura possa ter um comportamento dinâmico regular sendo uma estrutura irregular no ponto de vista da resistência ao sismo. Para tal, criaram-se modelos das estruturas mencionadas anteriormente utilizado o programa computacional SAP2000 (Fig. 4.6).

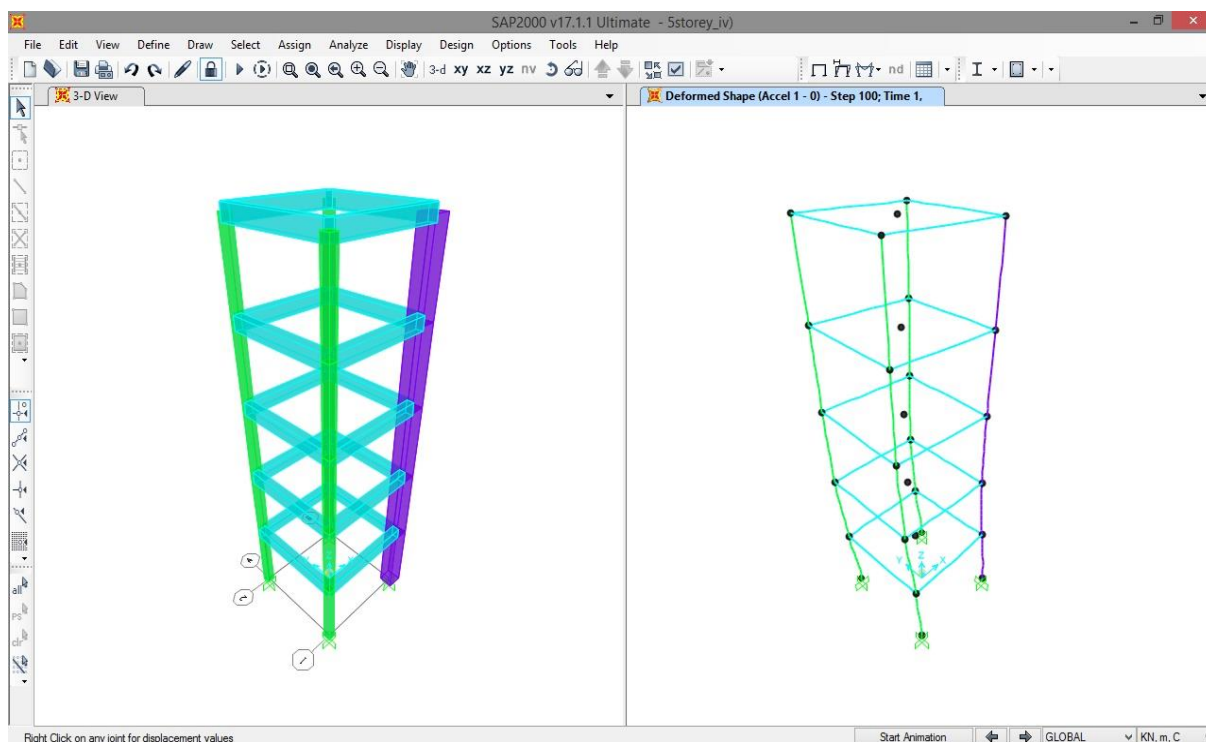


Fig. 4.6 - Exemplo modelo no programa SAP2000

Para a criação dos modelos, apenas os elementos estruturais com rigidez e ductilidade significativos devem ser modelados, ou seja, os elementos não estruturais podem ser ignorados. Contudo, o esforço transversal e deformações axiais podem ser consideradas em todos os membros sem um incremento significativo do esforço computacional. Uma aproximação aceitável dos pisos, para a maioria dos edifícios, é considerar pisos rígidos. Para propósitos de análises elásticas dinâmicas, são usadas as secções de betão, desprezando a rigidez do aço. Um modo com secção fendilhada deve ser usada para verificar o projeto final. [2]

O primeiro passo da análise dinâmica dos modelos estruturais foi o cálculo dos modos de vibração e frequência naturais. Para as estruturas regulares simétricas, que têm rigidez igual em ambas as direções, os períodos associados com o deslocamento lateral vão resultar em pares de períodos idênticos.

Foi com a informação dos modos de vibração que foram então calculadas as forças estáticas lineares referidas em 3.3.3, que posteriormente foram adicionadas no SAP2000.

Tanto as forças estáticas lineares como os acelerogramas foram inseridos no SAP2000 para todos os ângulos da estrutura de 0° a 360° , em intervalos de 10° . Tanto para as forças estáticas como para os acelerogramas foram efetuados dois casos, um sem carga vertical e outro com, como já foi acima referido. Com isto procedeu-se ao cálculo das estruturas obtendo assim a informação sobre os esforços nos pilares e vigas e deslocamentos nodais, sendo esta necessária para posteriormente se fazerem os gráficos polares pretendidos.

De seguida são representadas as legendas dos nós e elementos das estruturas de um andar e cinco andares respetivamente.

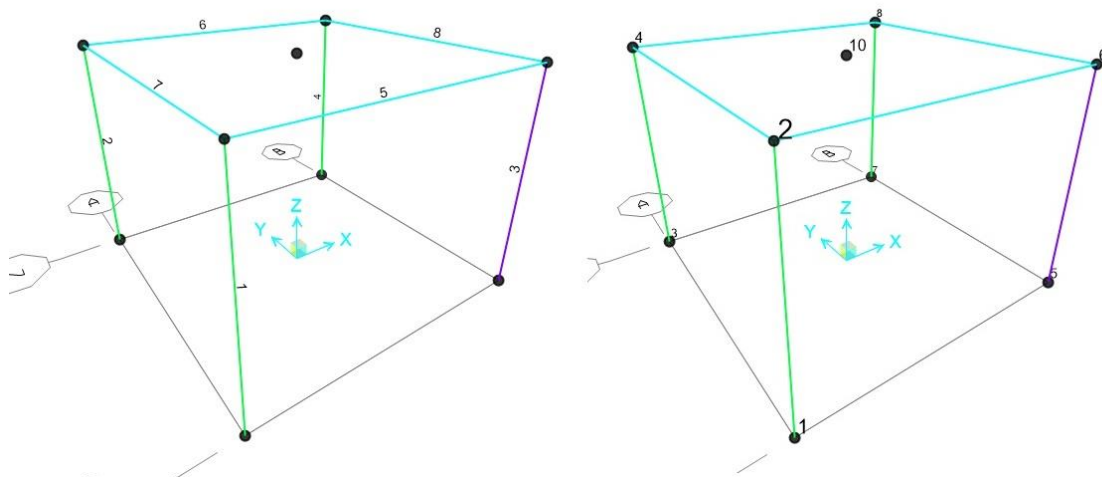


Fig. 4.7 - Legenda dos elementos e nós das estruturas de um andar

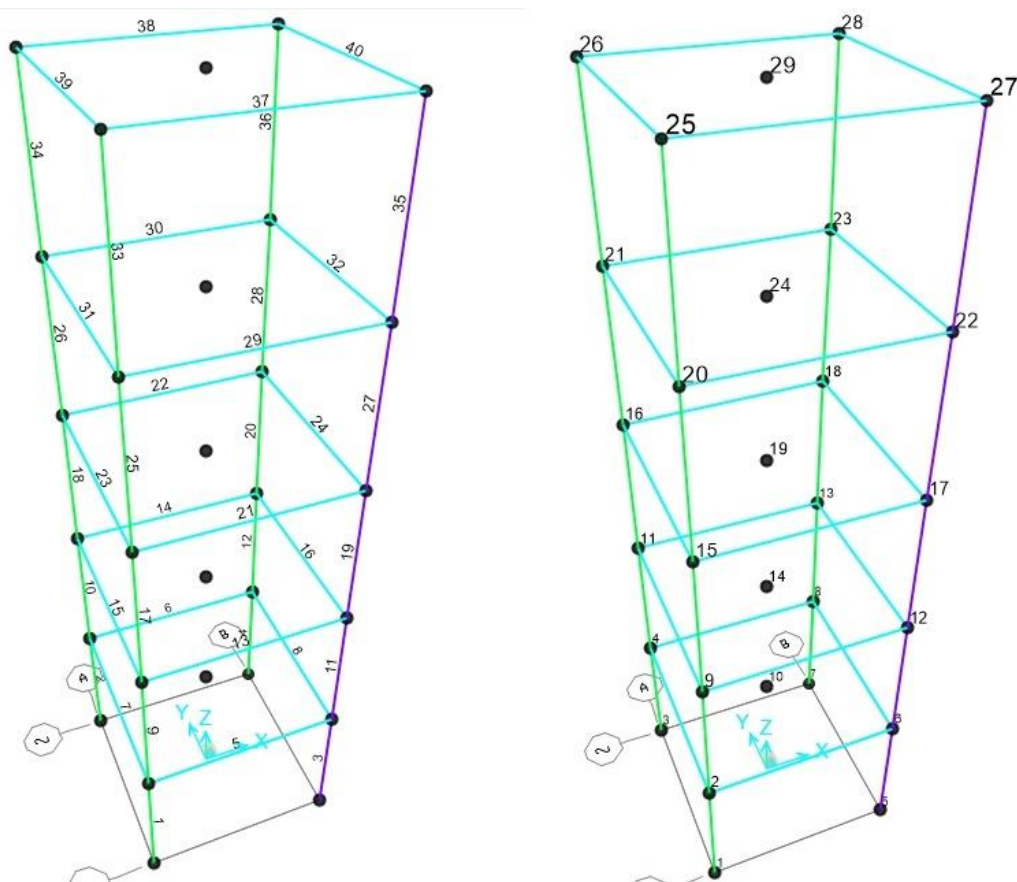


Fig. 4.8 - Legenda dos elementos e nós das estruturas de cinco andares

Para clarificar a informação obtida no SAP2000 recorreu-se ao programa computacional Matlab onde, utilizando linhas de código adequadas, se obtiveram gráficos polares com os esforços máximos obtidos

para cada elemento – viga e pilares –, para cada tipo de esforço – esforços transversos e momentos –, para cada ângulo e para cada tipo de caso de carga – força estática e acelerogramas. Também se obtiveram os gráficos relativamente a deslocamentos absolutos, utilizando o método da raiz quadrada da soma dos quadrados e a informação extraída do SAP2000 relativamente aos deslocamentos nas direções X e Y. Estes deslocamentos, nas estruturas de cinco andares, foram também transformados em deslocamentos relativos entre pisos, de modo a simplificar a análise entre pisos.

5

ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo irão ser analisados vários resultados obtidos através de processos anteriormente explicados. Para tal irão ser apresentados vários gráficos referentes aos diferentes tipos de estruturas, tanto para deslocamentos absolutos, que se refere à raiz quadrada da soma dos quadrados dos deslocamentos obtidos para as direções X e Y, como para os esforços nos elementos estruturais, tais como os esforços transversos e momentos fletores.

Esses mesmos gráficos irão ser acompanhados de legendas onde, no caso de ter carga vertical aplicada está indicado com DEAD à frente de cada caso, estão indicados os diferentes acelerogramas aplicados (Accel1, Accel2, Accel3 e Accel4) e forças estáticas (SF) ou no caso de estruturas de cinco andares existem dois tipos de forças estáticas aplicadas, as forças estáticas distribuídas triangularmente em altura (SFT) e as forças estáticas distribuídas uniformemente em altura (SFU). Para além disso são ainda legendados os valores máximos obtidos para cada sismo e força(s) estática(s), sendo estes representados também nos gráficos.

5.2. ESTRUTURAS DE 1 ANDAR

5.2.1. ESTRUTURA DUPLAMENTE SIMÉTRICA COM RIGIDEZ IGUAL NAS DUAS DIREÇÕES

Na estrutura que apresenta simetria em ambas as direções e com a mesma rigidez, como seria de esperar, o ângulo crítico para os deslocamentos absolutos não varia de sismo para sismo, nem varia tendo ou não carga vertical. A carga vertical apenas vai provocar um aumento dos valores dos esforços na estrutura e têm tendência para diminuir os deslocamentos da estrutura, como se pode observar nas Figs. 5.1 e 5.2. O ângulo crítico quanto ao deslocamento absoluto vai ser igual para qualquer ângulo de incidência, como se pode observar na Fig. 5.1.

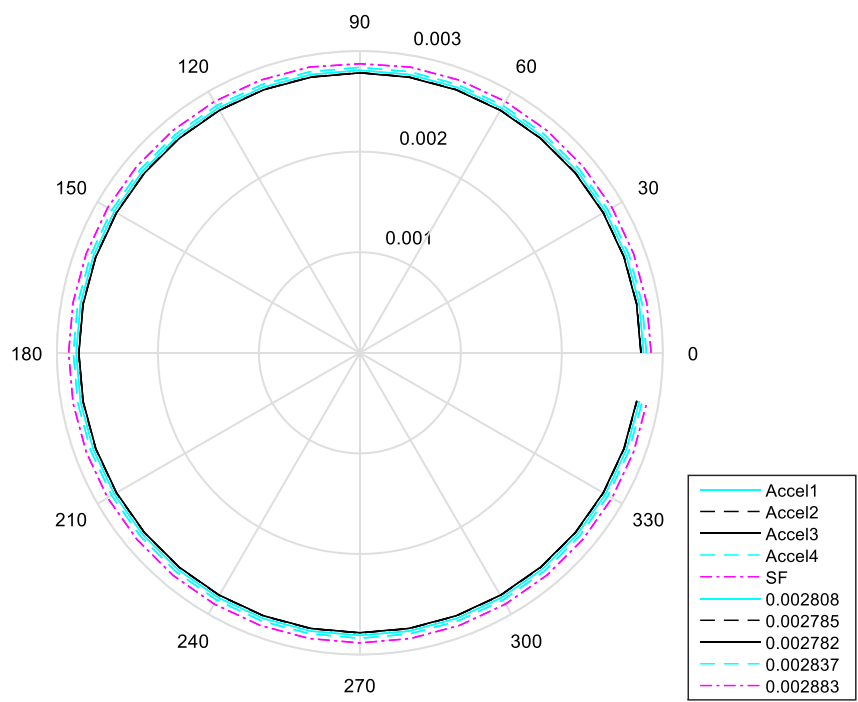


Fig. 5.1 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 2 - 1 Andar i)

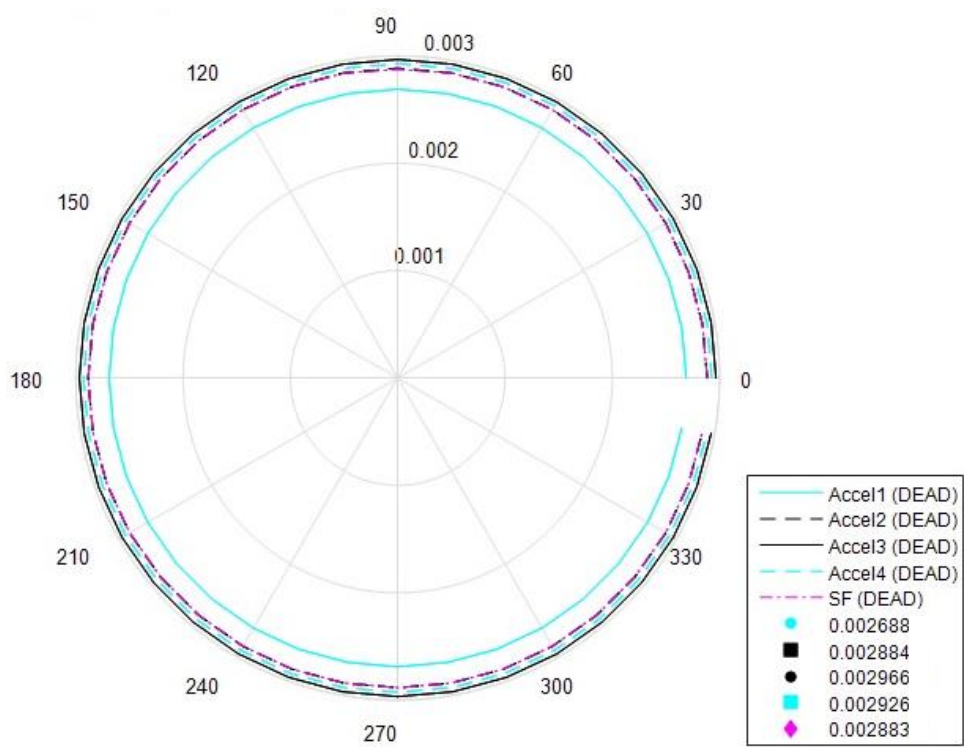


Fig. 5.2 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 2 - 1 Andar i)

Para os esforços, quer nos pilares e nas vigas, os ângulos críticos obtidos encontram-se sobre os eixos principais da estrutura. Os ângulos vão apenas variar consoante a direção dos esforços que se estão a analisar, sendo que os esforços V_x vão apresentar ângulos críticos sobre o eixo X enquanto V_y vai ter ângulos críticos sobre o eixo Y. Tal como nos deslocamentos absolutos, os ângulos críticos dos esforços não variam de sismo para sismo, tal como mostram as Figs. 5.3 e 5.4.

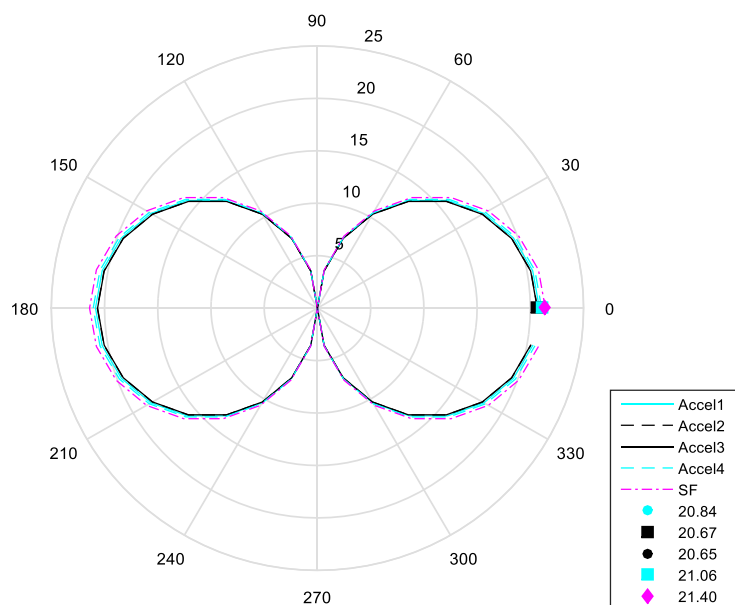


Fig. 5.3 - Força Viga V_x (s/ carga vertical) - Elemento 2 - 1 Andar i)

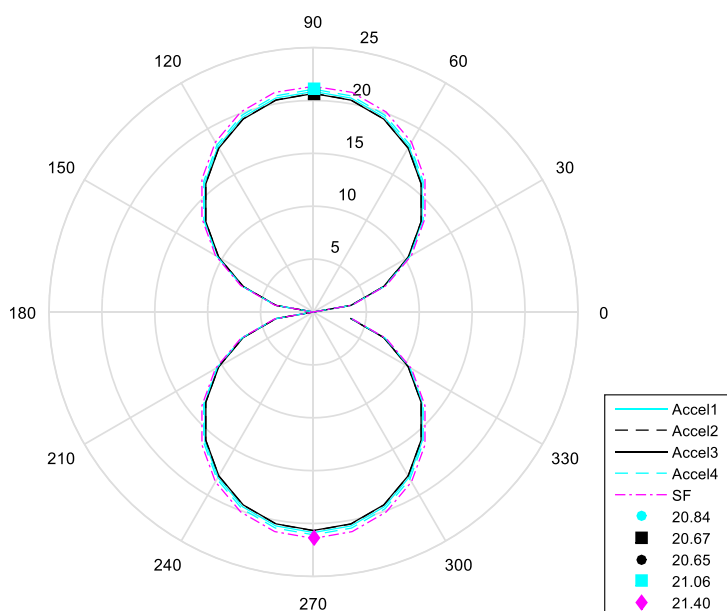


Fig. 5.4 - Força Viga V_y (s/ carga vertical) - Elemento 2 - 1 Andar i)

Nesta estrutura, sendo ela simétrica e de igual rigidez nas duas direções, já se previa que não iria haver qualquer influência dos ângulos críticos dos deslocamentos absolutos, tal como é bem explícito na Fig. 5.1.

Os ângulos obtidos para os deslocamentos absolutos estão relacionados com V_x e V_y , pois os valores máximos de V_x e V_y são iguais o que leva a que qualquer ângulo no deslocamento absoluto seja crítico.

5.2.2. ESTRUTURA DUPLAMENTE SIMÉTRICA COM RIGIDEZ DIFERENTE NAS DUAS DIREÇÕES

Na situação de uma estrutura simétrica nas duas direções mas com rigidez diferente, esta vai apresentar ângulos críticos de incidência iguais para todos os sismos. Como já seria de esperar os maiores deslocamentos dão-se na direção de menor rigidez, logo o ângulo crítico encontra-se sobre o eixo de menor rigidez da estrutura, tal como mostra a Fig. 5.5. Para o caso de ter ou não carga vertical a estrutura vai continuar a apresentar os mesmos ângulos, como se pode comparar entre as Figs. 5.5 e 5.6.

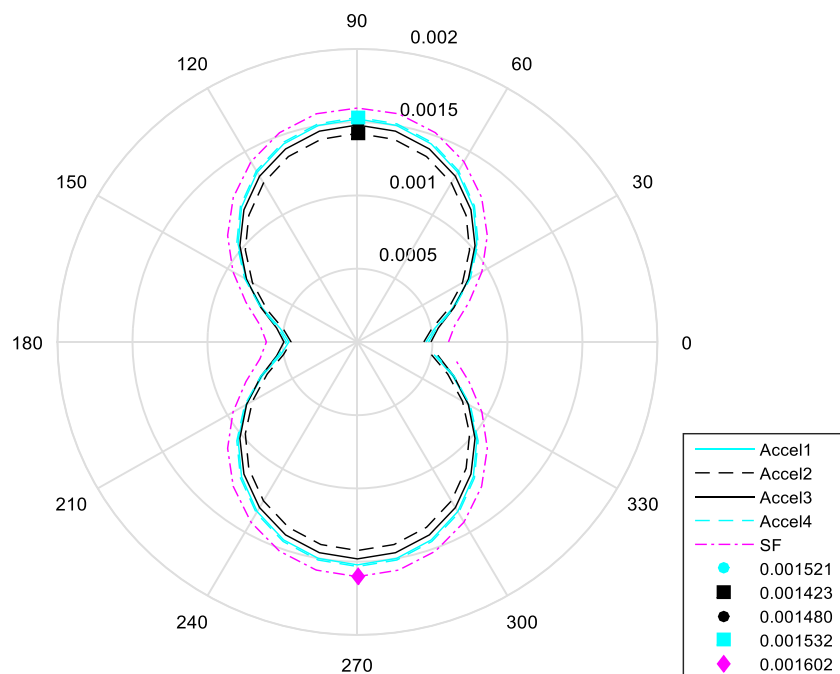


Fig. 5.5 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 2 - 1 Andar ii)

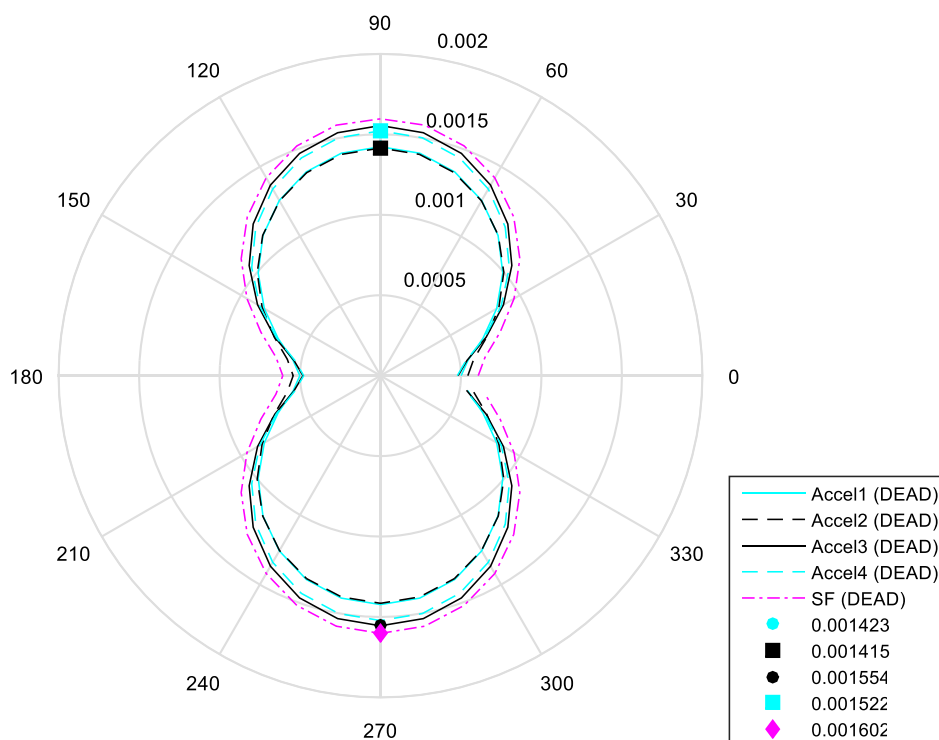
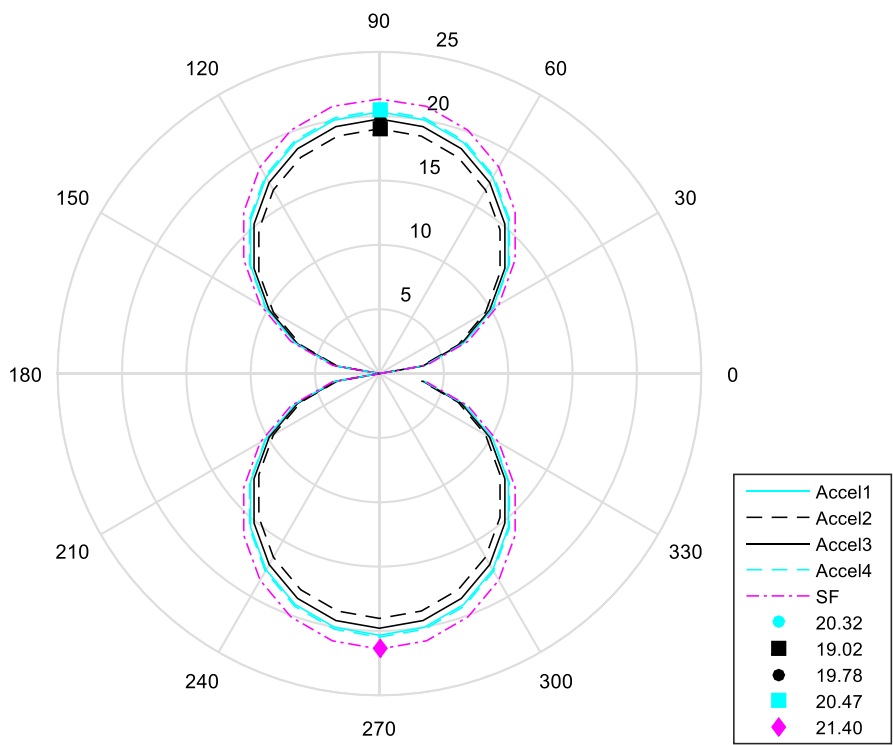
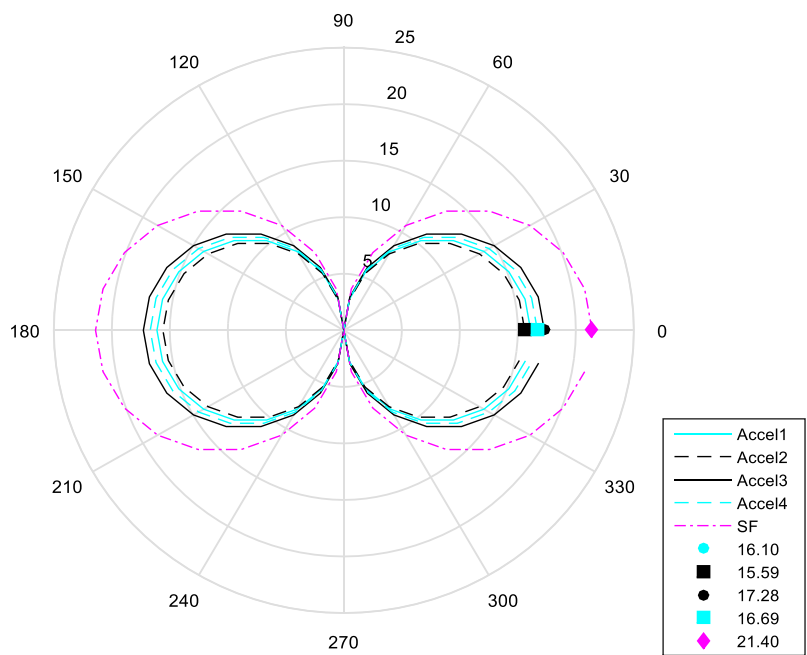


Fig. 5.6 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 2 - 1 Andar ii)

Tal como na estrutura anteriormente analisada, os ângulos obtidos para os esforços nos elementos estruturais vão-se encontrar sobre os eixos principais da estrutura. Estes também vão depender do esforço que está a ser analisado, sendo para os casos de V_x e M_y estarem sobre o eixo X, tal como está representado na Fig. 5.5, e para V_y e M_x estarem sobre o eixo Y, como é apresentado na Fig. 5.6. Para os esforços também se vão manter os ângulos críticos quer estes tenham ou não carga vertical aplicada.



Nesta situação, os ângulos dos deslocamentos e os esforços V_x e V_y , estão relacionados com a direção que vai ter maiores valores de esforços, que neste caso vai ser na direção Y que corresponde à direção com maiores deslocamentos, que como já seria de esperar é na direção onde a estrutura tem menor rigidez que vai gerar os maiores valores de esforços e deslocamentos, sendo que os esforços finais também têm a ver com a aceleração mobilizada e que não é visível do espetro.

5.2.3. ESTRUTURA SIMÉTRICA NUMA DIREÇÃO

No momento em que se passa a ter uma estrutura com apenas simetria numa direção, já se observam diferentes cenários para o ângulo crítico de incidência. No caso dos deslocamentos absolutos os ângulos obtidos são todos iguais, mantendo-se no eixo Y, mas quando a carga vertical é aplicada dois dos sismos, neste caso o sismo correspondente ao acelerograma 1 (azul) e à força estática (rosa), apresentam uma diferença em relação aos outros e em relação ao caso sem carga vertical, uma diferença de 10° tal como se pode comparar entre as Figs. 5.9 e 5.10.

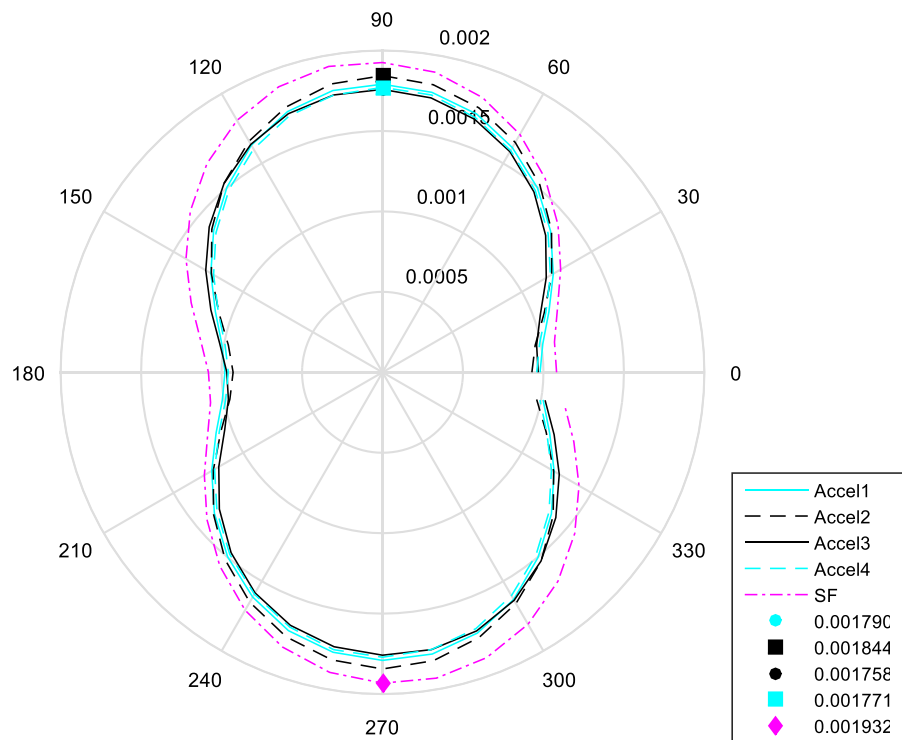


Fig. 5.9 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 6 - 1 Andar iii)

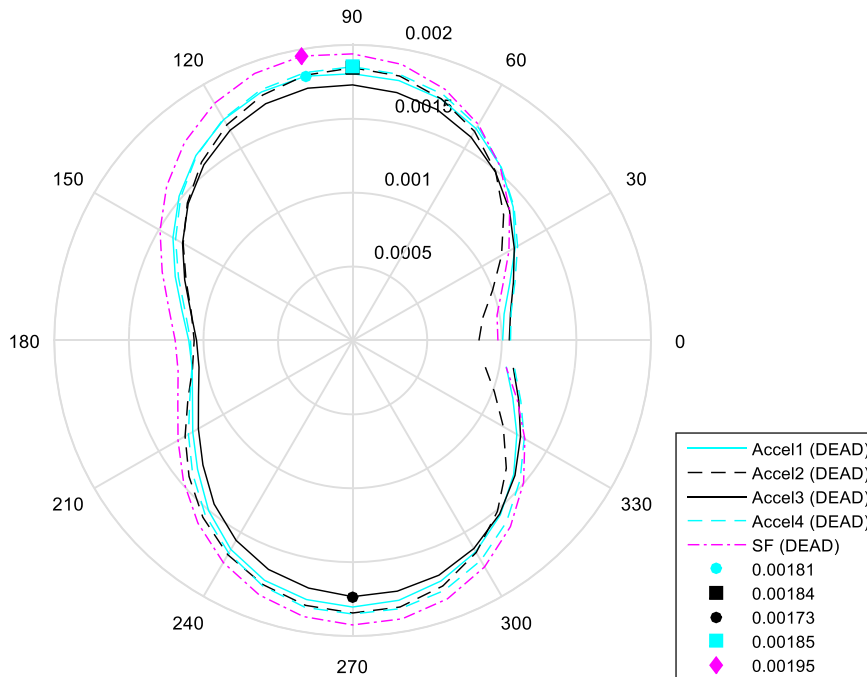


Fig. 5.10 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 6 - 1 Andar iii)

Nos esforços das vigas os ângulos obtidos para as vigas dispostas na direção Y estão sobre esse mesmo eixo enquanto as vigas dispostas na direção X apresentam variações de sismo para sismo, sendo que alguns estão sobre o eixo X e outros têm uma variação de 10° em relação a esse mesmo eixo, como se pode observar na Fig. 5.11. Quando é aplicada carga vertical na estrutura alguns dos sismos para as vigas dispostas na direção X passam a ter ângulos críticos com um desvio de 10° face à situação em que a estrutura não apresenta carga vertical, de resto tudo se mantém igual.

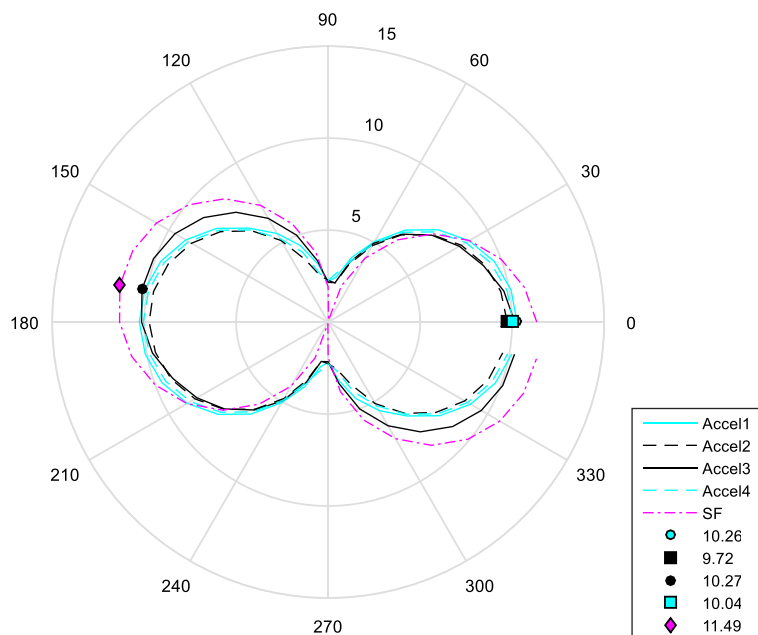


Fig. 5.11 - Força Viga Vx (s/ carga vertical) - Elemento 5 - 1 Andar iii)

Nos esforços nos pilares, tal como acontece nos esforços das vigas, o esforço V_x apresenta ângulos críticos diferentes entre sismos, alguns sobre o eixo X e outros com um desvio de 10° , e quando é aplicada a carga vertical existem diferenças, passando alguns ângulos dos sismos a terem um desvio de 10° , tal como mostra a Fig. 5.12. Para o esforço V_y os ângulos são sempre iguais qualquer que seja o sismo e quer tenha ou não carga vertical, estando eles sobre o eixo Y, como se pode observar na Fig. 5.13.

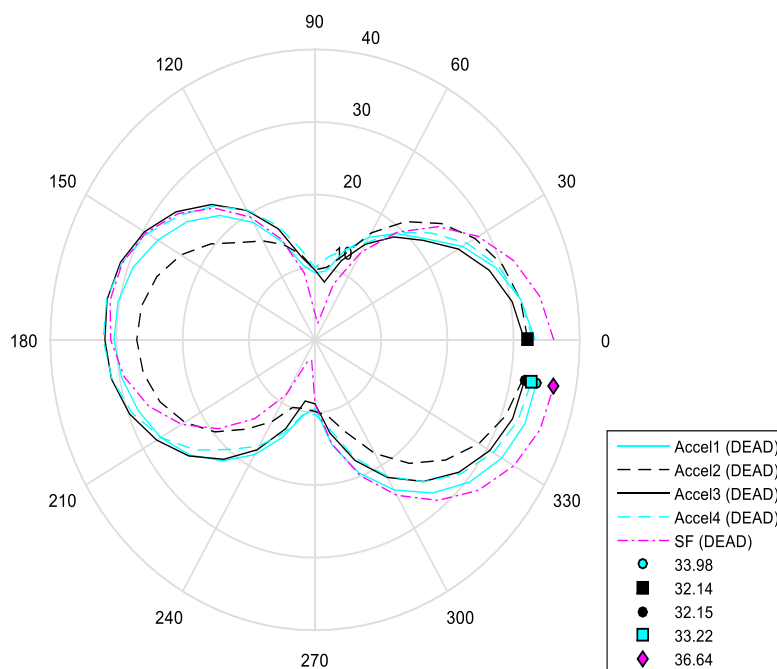


Fig. 5.12 - Força Pilar V_x (c/ carga vertical) - Elemento 3 - 1 Andar iii)

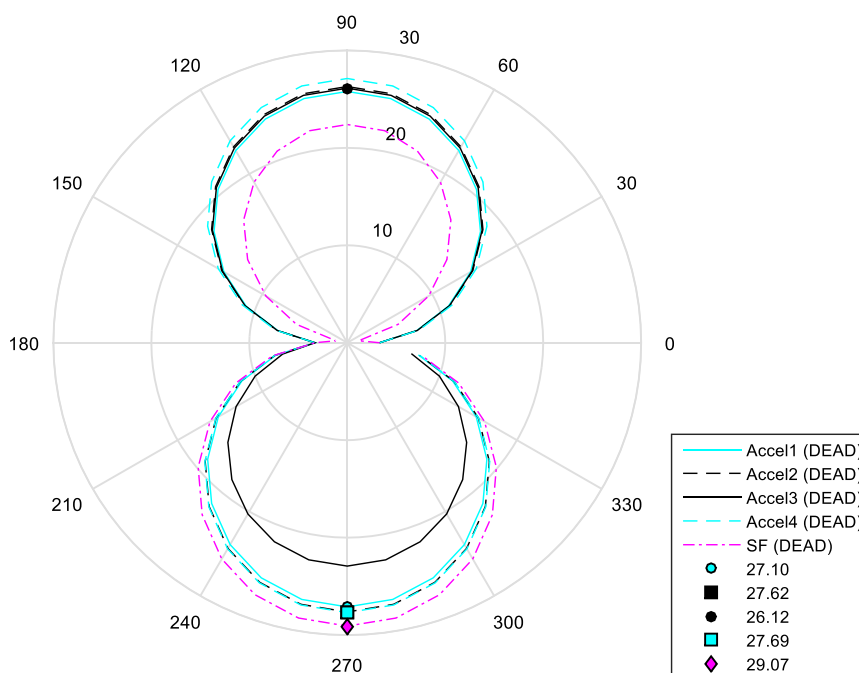


Fig. 5.13 - Força Pilar V_y (c/ carga vertical) - Elemento 3 - 1 Andar iii)

Relativamente aos desvios dos ângulos nos deslocamentos absolutos, estes estão relacionados com os valores de V_x e V_y , dependendo da grandeza dos valores que cada um tem na influência da estrutura. Os ângulos obtidos que estão 10° relativamente ao eixo X deve-se à não simetria sobre o eixo Y, gerando assim torção na estrutura.

5.2.4. ESTRUTURA ASSIMÉTRICA

Numa estrutura assimétrica o comportamento da estrutura face ao sismo vai ser mais complexo. Nesta situação o ângulo crítico quanto ao deslocamento absoluto varia consoante o sismo aplicado, à exceção de alguns casos em que dois ou três dos sismos apresentam os mesmos ângulos, contudo esta pequena diferença de ângulos situa-se num intervalo de 20° a 30° , tal como mostra a Fig. 5.14. A presença da carga vertical neste cenário não vai influenciar o ângulo crítico de incidência, apenas influencia num dos casos o sentido em que o sismo é aplicado mas como neste estudo o sentido não é relevante considera-se que a carga vertical não influencia os ângulos críticos. A presença de carga vertical na estrutura vai aumentar os deslocamentos observados na estrutura.

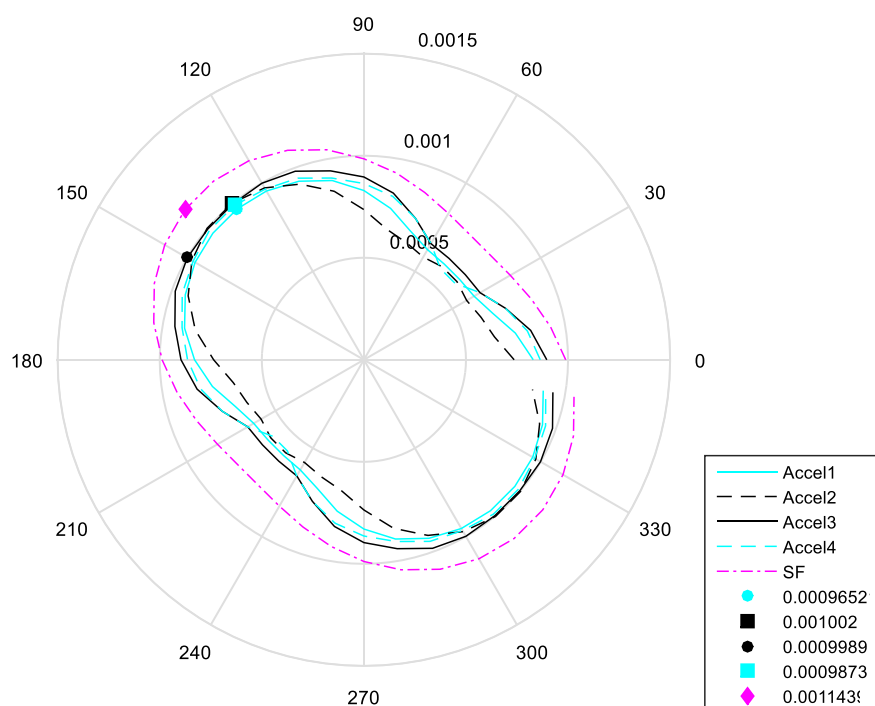


Fig. 5.14 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 6 - 1 Andar iv)

Quanto aos esforços nos elementos estruturais, neste caso nas vigas, os ângulos obtidos variam de sismo para sismo e também variam para o caso com carga vertical. Os ângulos neste caso vão ter um intervalo de 30° em grande parte dos casos, havendo alguns que possam subir para 40° de diferença entre sismos ou mesmo diminuir para 20° , sem que nunca haja sismos em que o intervalo de ângulos críticos obtidos para o mesmo elemento seja inferior a 20° .

Os esforços nos pilares vão também apresentar diferentes ângulos de sismo para sismo, apresentando também intervalos de 30° entre sismos, tal como se pode observar nas Figs. 5.15 e 5.16. Quando é aplicada carga vertical, tal como aconteceu nos esforços nas vigas, este não vai fazer alterar os valores dos ângulos críticos face à situação em que a estrutura não está sujeita a carga vertical.

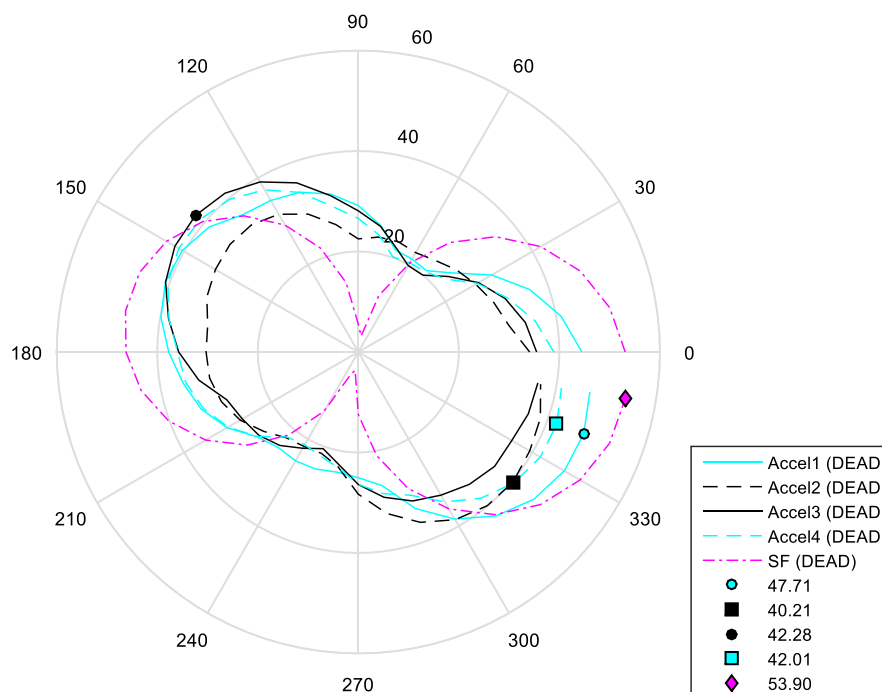


Fig. 5.15 - Força Pilar Vx (c/ carga vertical) - Elemento 3 - 1 Andar iv)

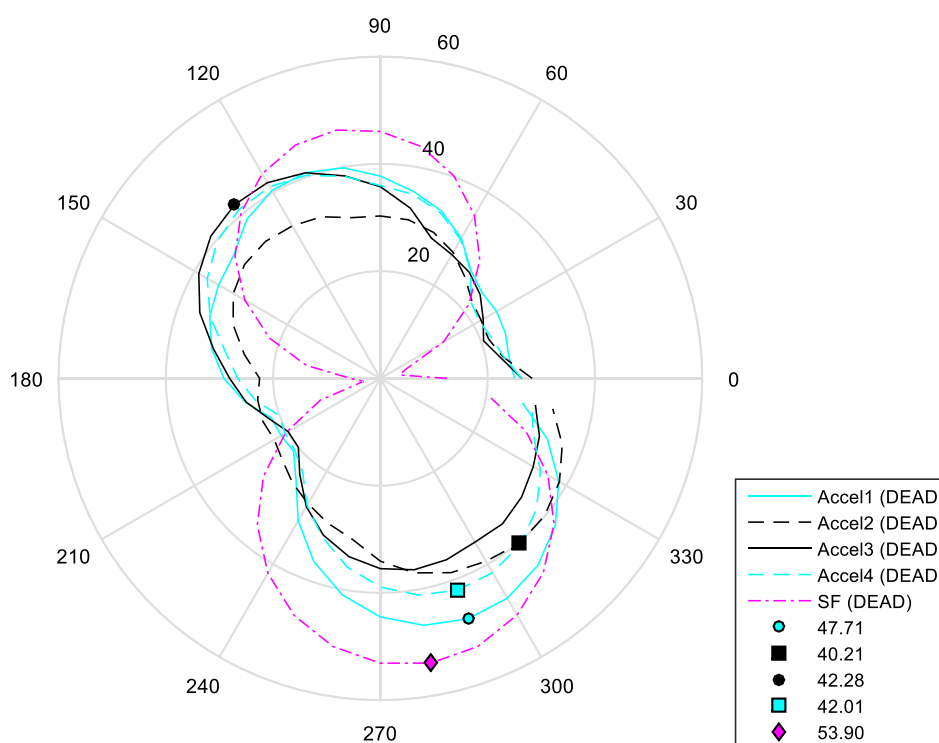


Fig. 5.16 - Força Pilar Vy (c/ carga vertical) - Elemento 3 - 1 Andar iv)

Através dos gráficos analisados pôde-se verificar que os ângulos dos pilares 2 e 3 têm os deslocamentos diretamente relacionados com V_x e V_y dos respetivos pilares. Já o deslocamento do pilar 1 está relacionado com V_y e o deslocamento do pilar 4 com V_x . Estas situações ocorrem pois é nestas situações em que estes esforços apresentam os maiores valores que conjugados com os esforços na outra direção há predominância do maior esforço logo há tendência dos deslocamentos terem ângulos críticos mais semelhantes aos obtidos pelos maiores esforços.

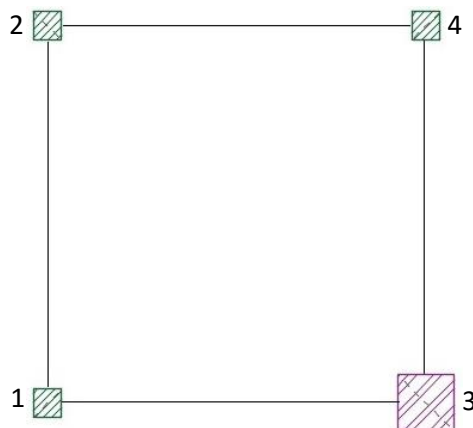


Fig. 5.17 - Legenda dos pilares

5.3. ESTRUTURAS DE 5 ANDARES

5.3.1. ESTRUTURA DUPLAMENTE SIMÉTRICA COM RIGIDEZ IGUAL NAS DUAS DIREÇÕES

Tal como na estrutura de um andar simétrica observou-se que o ângulo crítico, relativamente ao deslocamento absoluto, não varia de sismo para sismo, nem na aplicação de uma carga vertical na estrutura, tal como se pode observar nas Figs. 5.18 e 5.19. Esta situação já era esperada visto que se trata de uma estrutura simétrica nas duas direções em que a rigidez da estrutura é igual nessas direções, tal como aconteceu na estrutura de 1 andar. Em altura o ângulo crítico também não vai sofrer qualquer alteração de sismo para sismo tal como com ou sem carga vertical. Pode-se observar que os deslocamentos obtidos nesta estrutura tiveram valores máximos no segundo andar, sendo que estes valores reduziram quando aplicada a carga vertical enquanto os outros pisos tiveram um aumento do deslocamento com a aplicação da carga vertical.

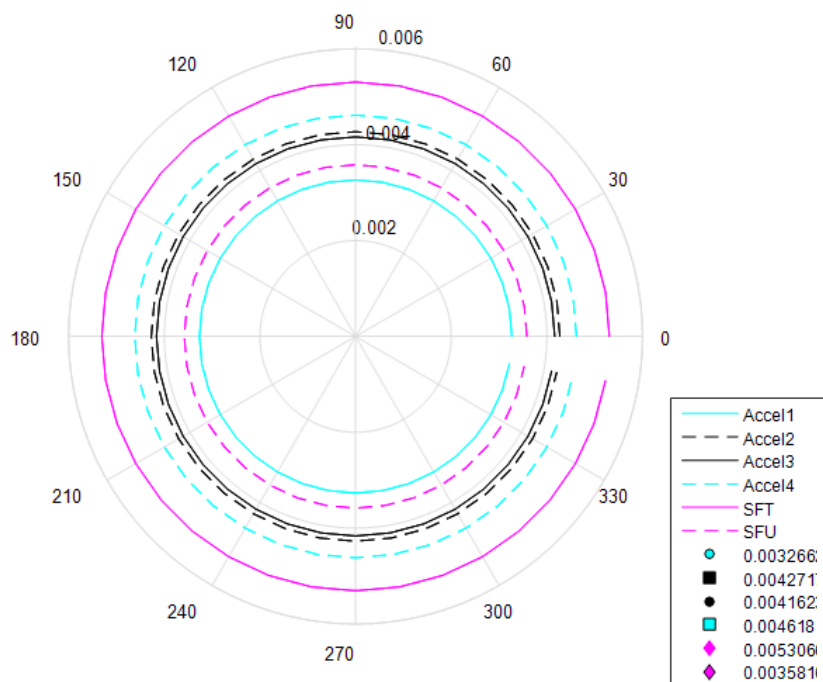


Fig. 5.18 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 20 (4º Andar) - 5 Andares i)

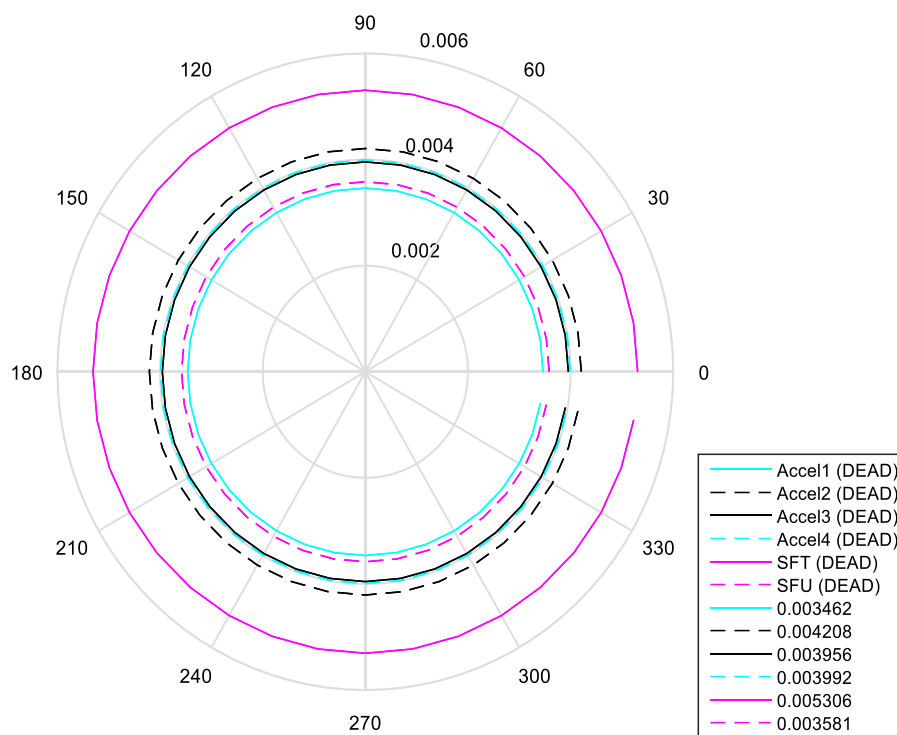


Fig. 5.19 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 20 (4º Andar) - 5 Andares i)

Os esforços nos elementos estruturais, tanto vigas como pilares, apresentam ângulos críticos iguais para qualquer sismo, tal como está representado nas Figs. 5.20 e 5.21, com ou sem carga vertical, para qualquer andar da estrutura. Estes ângulos, tal como acontece nos deslocamentos, já seriam de esperar tendo em conta a geometria da estrutura. Os valores dos esforços nos elementos vão diminuindo gradualmente em altura tanto para o caso com ou sem carga vertical, atingindo os maiores valores quando é aplicada a carga vertical como seria espetável.

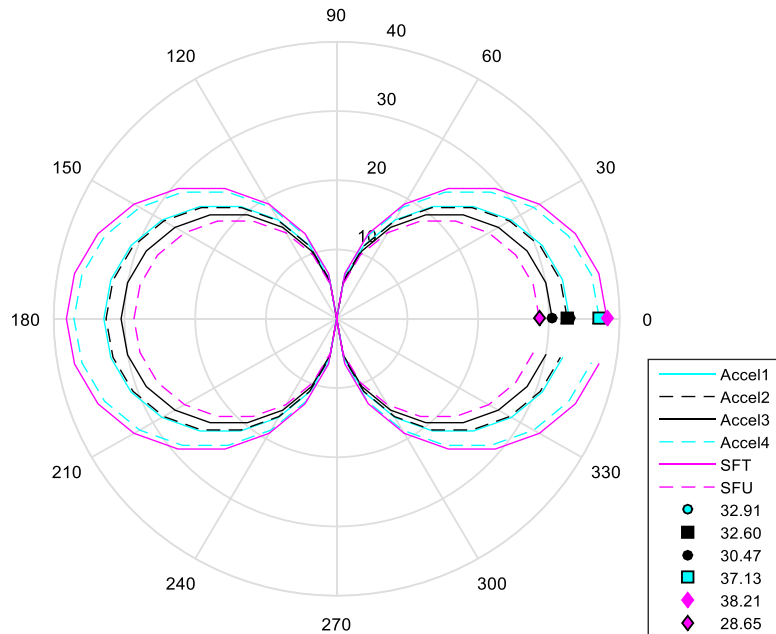


Fig. 5.20 - Força Pilar V_x (s/ carga vertical) - Elemento 20 (3º Andar) - 5 Andares i)

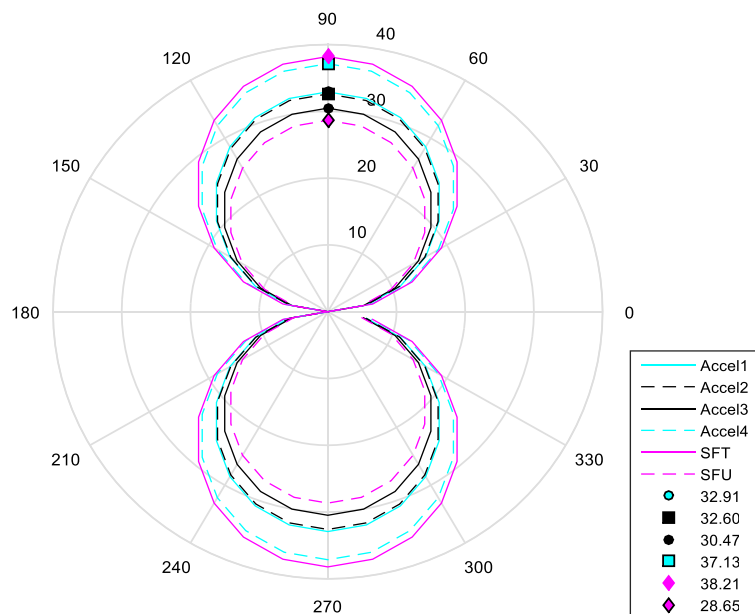


Fig. 5.21 - Força Pilar V_y (s/ carga vertical) - Elemento 20 (3º Andar) - 5 Andares i)

A relação entre os ângulos críticos dos deslocamentos absolutos e os esforços V_x e V_y estão diretamente ligados, visto que os valores dos ângulos críticos máximos obtidos em V_x e V_y coincidem com os valores dos ângulos máximos dos deslocamentos absolutos e sendo os esforços de igual grandeza leva a que os deslocamentos absolutos sejam máximos para qualquer ângulo a que o sismo atue na estrutura.

5.3.2. ESTRUTURA DUPLAMENTE SIMÉTRICA COM RIGIDEZ DIFERENTE NAS DUAS DIREÇÕES

Os ângulos críticos dos deslocamentos absolutos nesta estrutura não variam de sismo para sismo, nem com ou sem carga vertical, até ao terceiro andar, como se pode ver nas Figs. 5.22 e 5.23. Contudo a partir do quarto andar, neste caso quarto e quinto andares, a estrutura apresenta ângulos críticos diferentes de sismo para sismo, sendo que dois dos acelerogramas provocam ângulos críticos com uma diferença de 90° face aos restantes sismos e aos restantes andares, como se pode observar na Fig. 5.24. Esta situação mantém-se quer a estrutura esteja com ou sem carga vertical aplicada. Toda a estrutura apresenta um comportamento esperado face à rigidez que esta apresenta em ambas as direções, à exceção do caso em que a partir do quarto piso a estrutura para alguns dos sismos aplicados apresenta maiores valores na direção de maior rigidez levando assim a um comportamento inesperado por parte da estrutura. Os valores dos deslocamentos absolutos obtidos variam consoante se tem ou não carga vertical aplicada, sendo que para alguns sismos os deslocamentos aumentam e para outros diminuem com a aplicação da carga vertical.

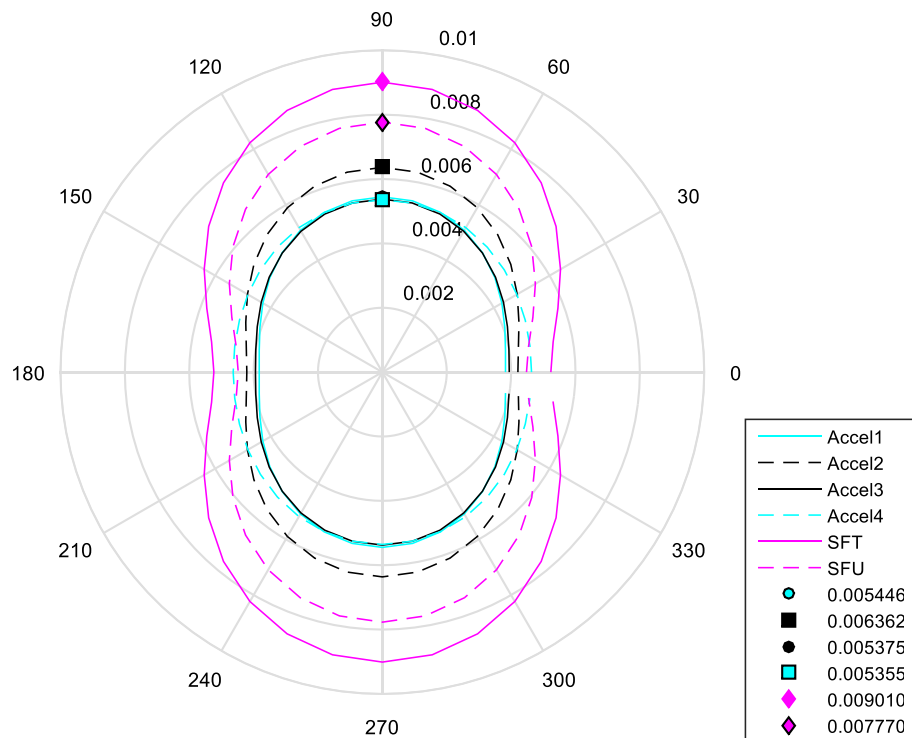


Fig. 5.22 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 11 (2º Andar) - 5 Andares ii)

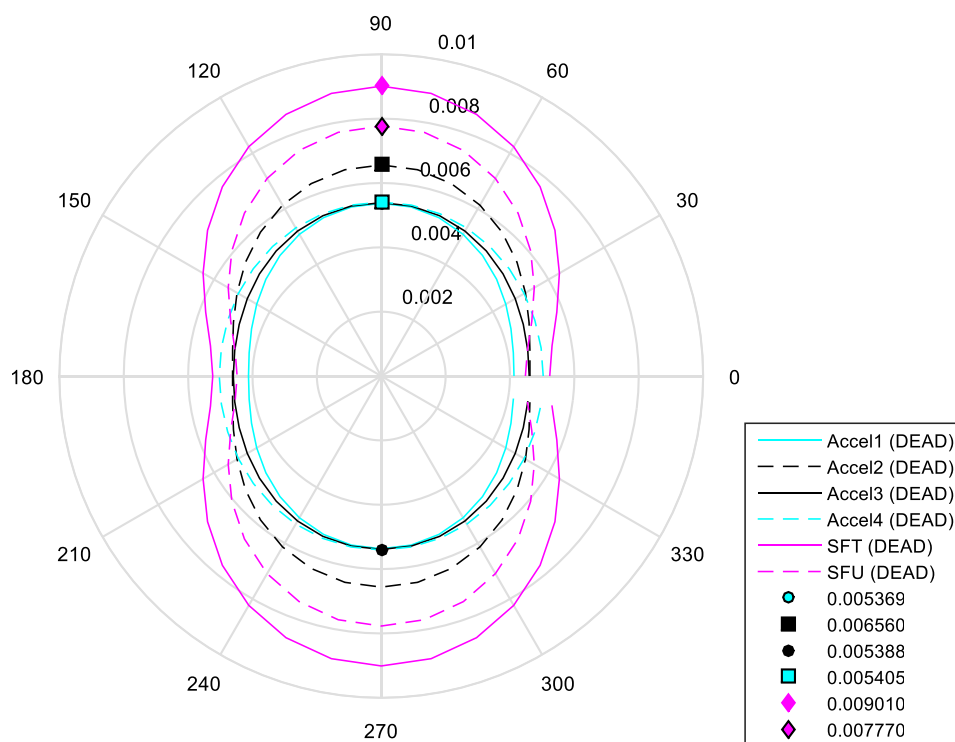


Fig. 5.23 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 11 (2º Andar) - 5 Andares ii

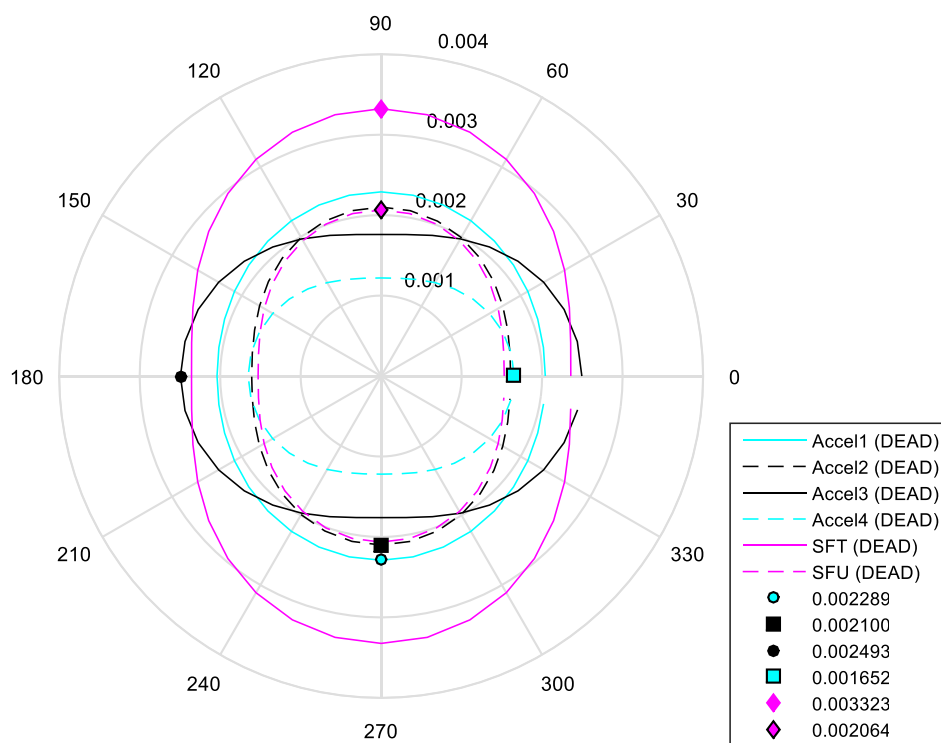


Fig. 5.24 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 26 (5º Andar) - 5 Andares ii

Quanto aos esforços nos elementos estruturais, tanto nas vigas como nos pilares, os ângulos críticos não variam de sismo para sismo nem com ou sem a aplicação da carga vertical, como mostram as Figs. 5.25 e 5.26. Estes também não variam com a altura da estrutura e os valores dos esforços são maiores na direção de maior rigidez, tal como seria de esperar.

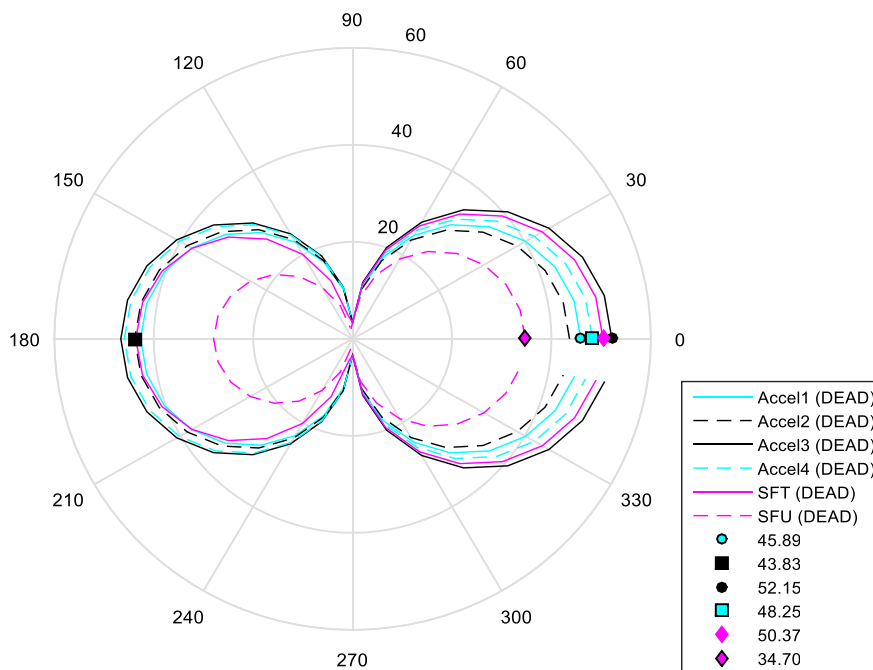


Fig. 5.25 - Força Pilar V_x (c/ carga vertical) - Elemento 28 (4º Andar) - 5 Andares ii)

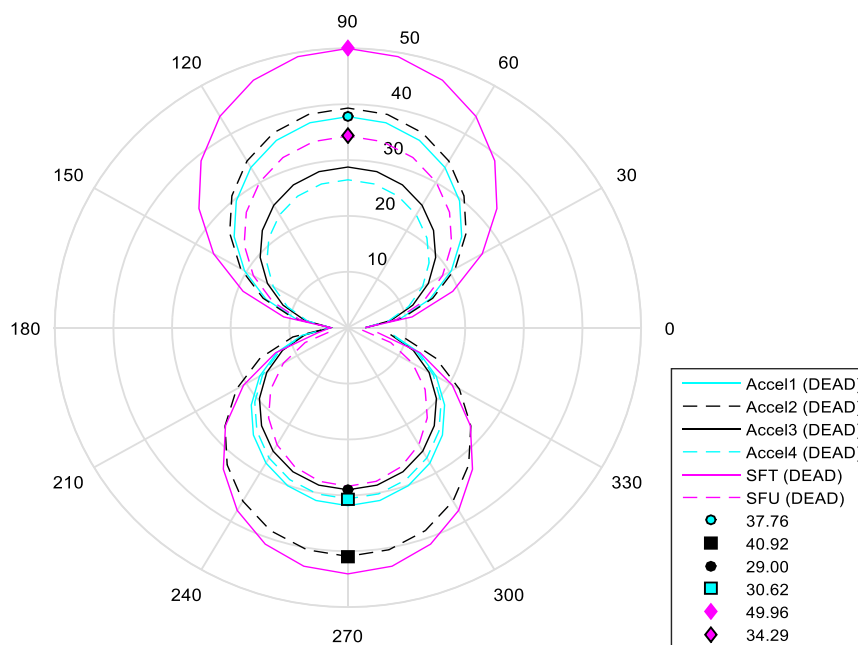


Fig. 5.26 - Força Pilar V_y (c/ carga vertical) - Elemento 28 (4º Andar) - 5 Andares ii)

Os ângulos obtidos para os deslocamentos estão relacionados com os obtidos para os esforços V_x e V_y , com a exceção dos valores obtidos para os deslocamentos no quarto e quinto andares, que para alguns dos sismos não apresentam valores coerentes com os que seriam de esperar.

5.3.3. ESTRUTURA SIMÉTRICA NUMA DIREÇÃO

Quando a estrutura é simétrica apenas numa direção é de esperar que esta venha a ter torção, pois o centro de massa não vai coincidir com o centro de rigidez. Os ângulos dos deslocamentos absolutos obtidos variam de sismo para sismo, não havendo nenhum caso em que todos os sismos obtenham o mesmo ângulo crítico. O mesmo acontece quando se aplica carga vertical, e mesmo entre a situação em que a carga não está ou está aplicada o ângulo crítico varia. Em altura o ângulo vai variando, sendo que perto da base da estrutura os ângulos críticos obtidos têm tendência a estarem perpendiculares ao eixo de não simetria (eixo Y), como se pode observar na Fig. 5.27, mas à medida que se vai analisando ao longo da altura da estrutura observa-se que os ângulos críticos têm tendência a ficarem mais perto do eixo de simetria, tal como se pode observar nas Figs. 5.28 e 5.29. Contudo estas tendências são apenas para alguns sismos, e para quatro deles os ângulos vão variando de forma rotacional em altura, onde os ângulos vão sofrendo uma alteração no sentido anti-horário.

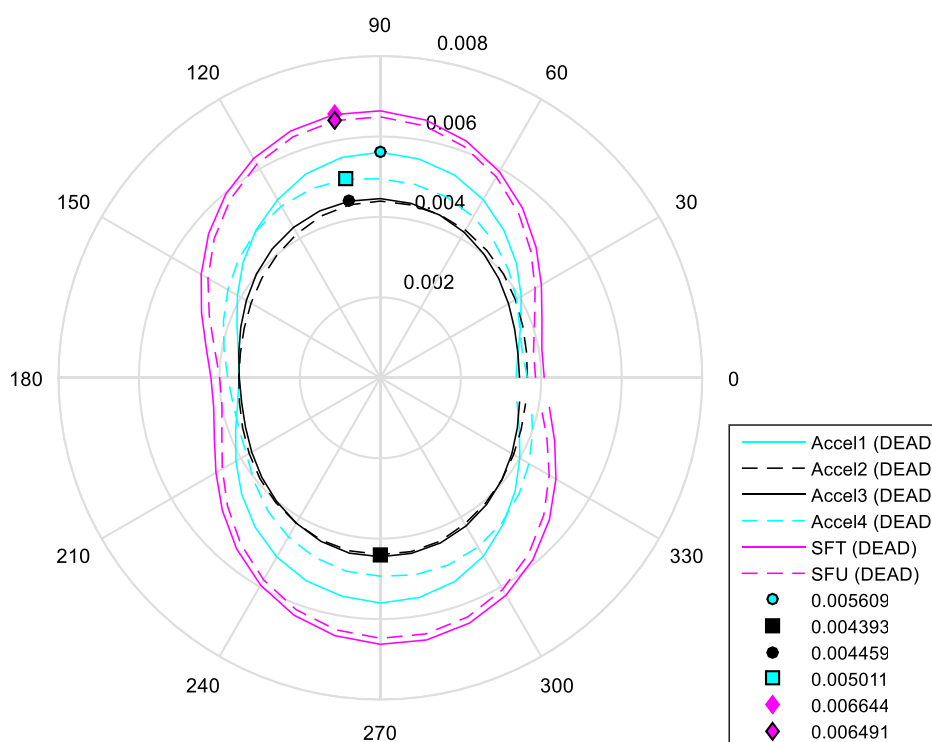


Fig. 5.27 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 6 (1º Andar) - 5 Andares iii)

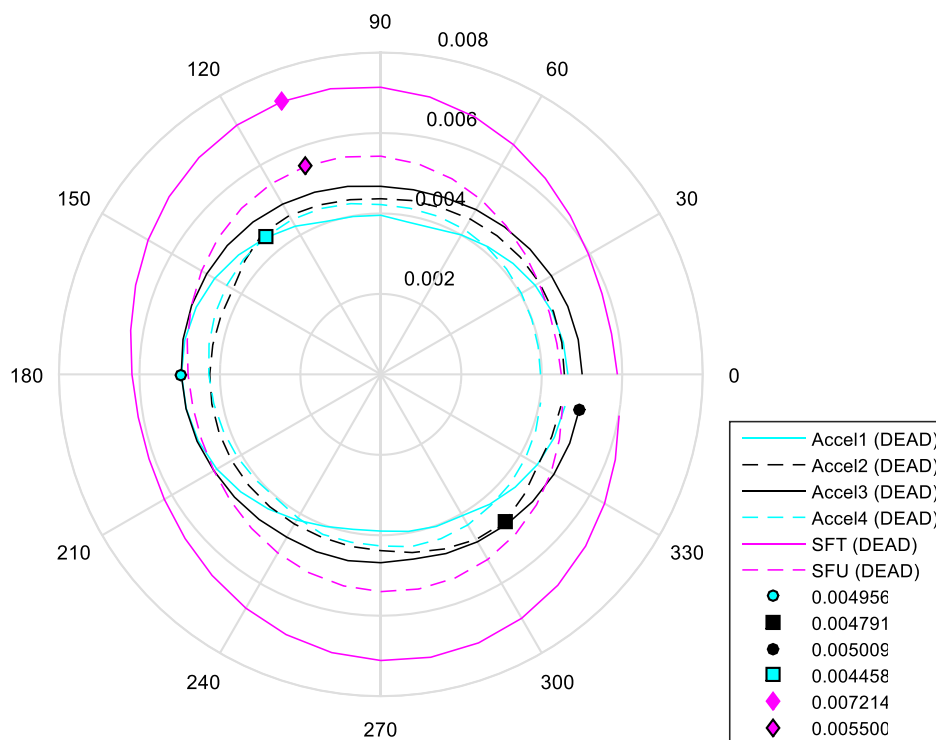


Fig. 5.28 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 17 (3º Andar) - 5 Andares iii)

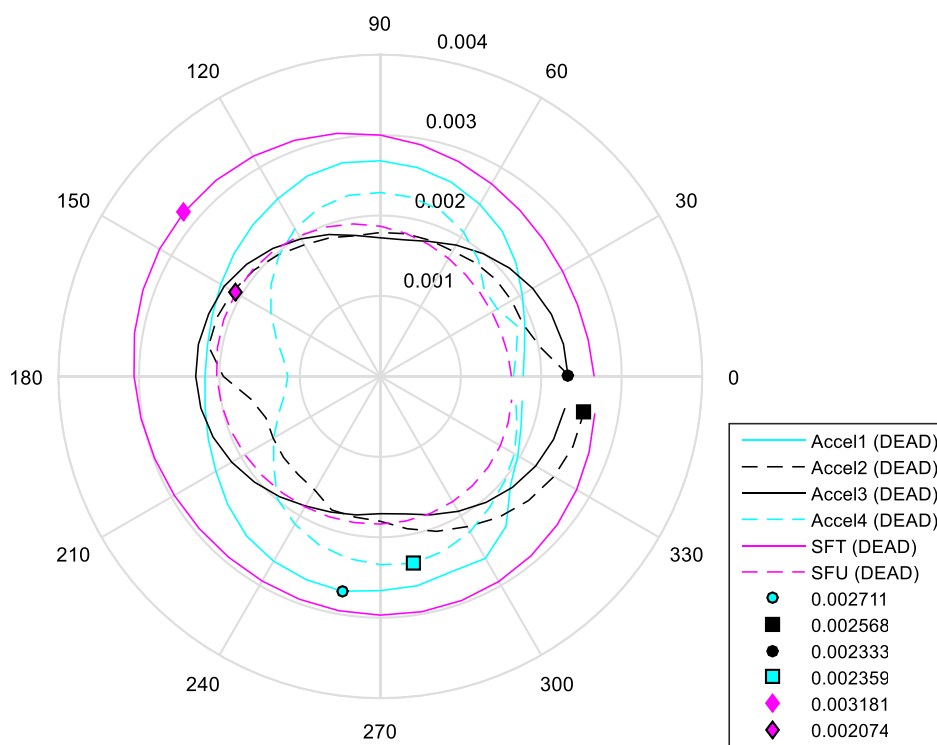


Fig. 5.29 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 27 (5º Andar) - 5 Andares iii)

Para os esforços das vigas observou-se que os ângulos críticos variavam de sismo para sismo quando se trata de forças de corte sobre o eixo simétrico (eixo X) podendo ter até 10° de desvio em relação a esse mesmo eixo, enquanto para o outro eixo o ângulo é constante para qualquer sismo. Esta variação de sismo para sismo só ocorre até ao terceiro andar inclusive quando não está aplicada carga vertical, mas quando esta é aplicada esta variação só ocorre até ao segundo andar na maioria dos sismos, o que pode ser um indício de que quando a estrutura tem aplicada carga vertical, esta ajuda a estabilizar o ângulo crítico da estrutura em altura. Para todos os outros casos o ângulo não varia quer a estrutura tenha ou não carga vertical.

Nos esforços dos pilares, neste caso Vx, os ângulos obtidos variam de sismo para sismo praticamente em todos os andares da estrutura. Em altura os ângulos de cada sismo também variam. Já no caso em que se aplica ou não a carga vertical não há alteração do ângulo crítico, à exceção de um dos sismos, neste caso do acelerograma 4, que no terceiro e quarto andares apresenta ângulos diferentes em dois pilares em cada andar distintos, como mostram as Figs. 5.30 e 5.31 para o caso do terceiro andar e as Figs. 5.32 e 5.33 para o caso do quarto andar. Os esforços Vy dos pilares apresentam ângulos iguais para todos os sismos, com ou sem carga vertical e em altura, ou seja, quando há simetria não à qualquer influência no ângulo crítico tal como era de esperar. Todos os ângulos obtidos dos esforços nos pilares situam-se sobre os eixos X e Y ou em algumas ocasiões estão desviados 10° relativamente ao eixo X.

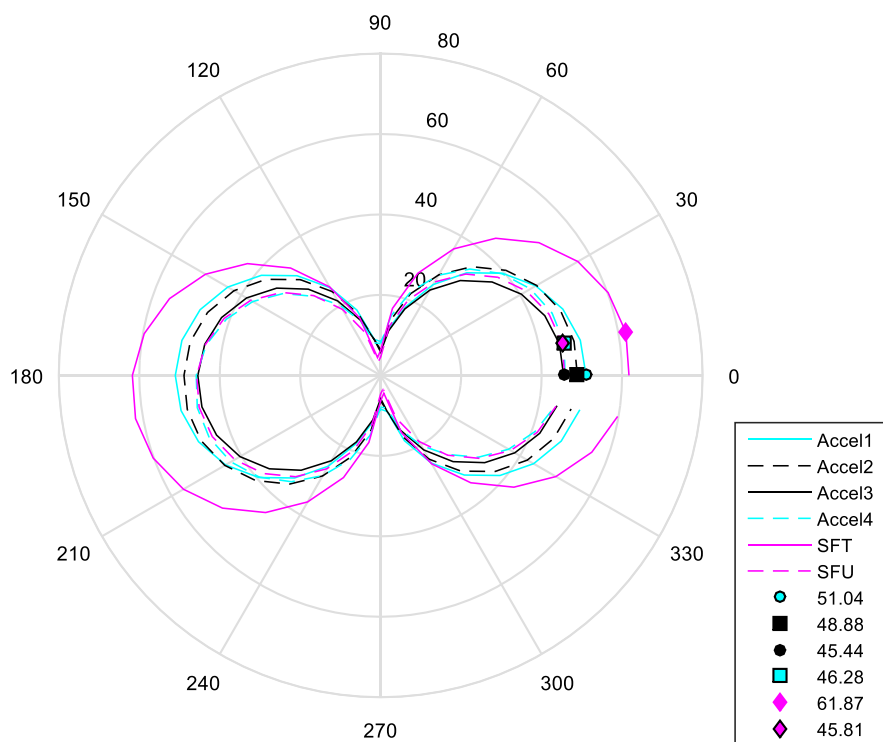


Fig. 5.30 - Força Pilar Vx (s/ carga vertical) - Elemento 20 (3º Andar) - 5 Andares iii)

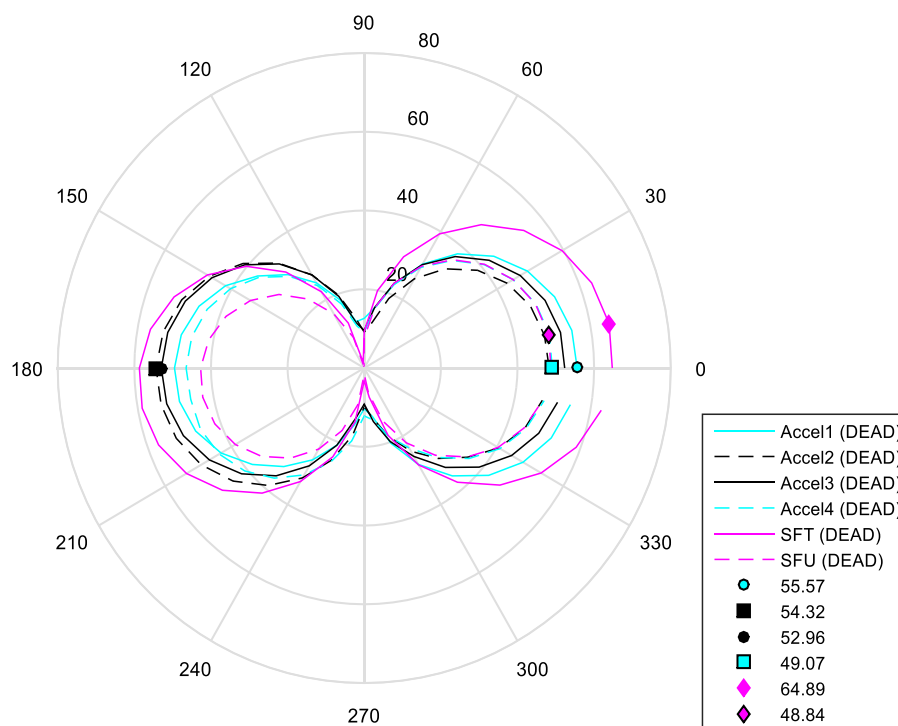


Fig. 5.31 - Força Pilar Vx (c/ carga vertical) - Elemento 20 (3º Andar) - 5 Andares iii)

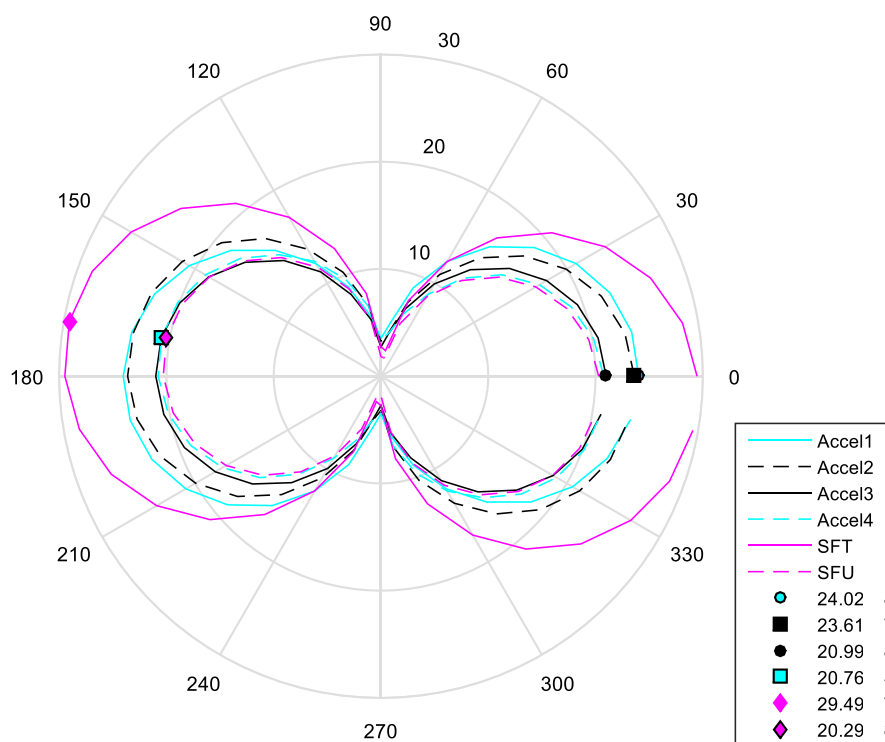


Fig. 5.32 - Força Pilar Vx (s/ carga vertical) - Elemento 25 (4º Andar) - 5 Andares iii)

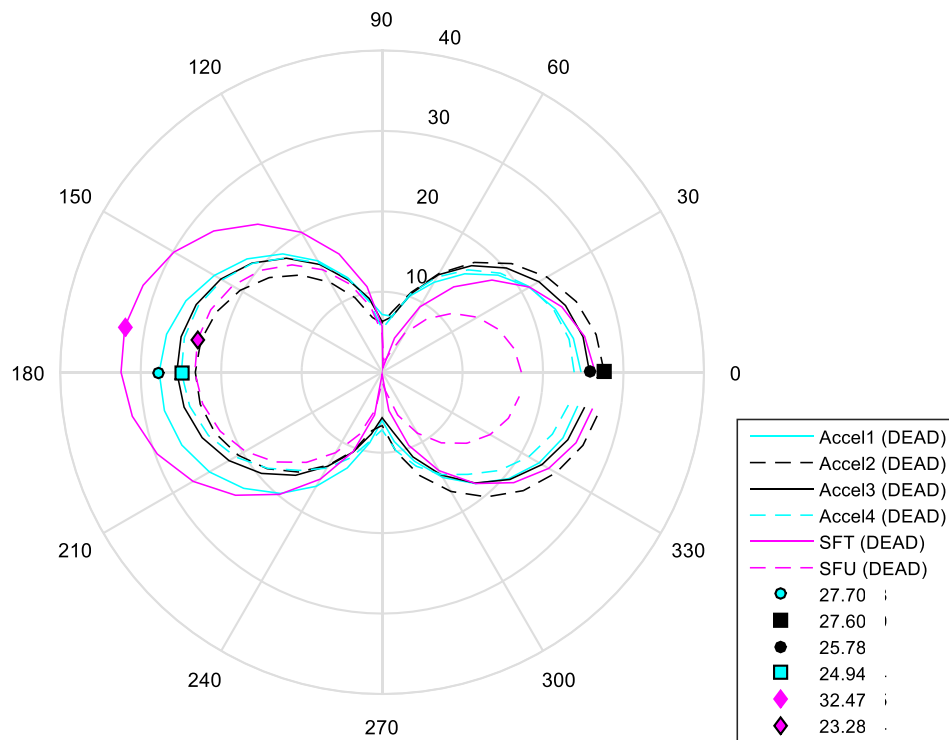


Fig. 5.33 - Força Pilar V_x (c/ carga vertical) - Elemento 25 (4º Andar) - 5 Andares iii)

Os ângulos obtidos para os deslocamentos absolutos estão relacionados com V_x e V_y no sentido em que são influenciados pelos valores dos esforços V_x e V_y , ou seja, o ângulo tende a ir mais para a direção do ângulo do esforço que tiver o maior valor e essa proximidade é tanto maior quanto maior for a diferença entre os esforços V_x e V_y .

5.3.4. ESTRUTURA ASSIMÉTRICA

Nesta estrutura, assimétrica, os ângulos críticos dos deslocamentos absolutos variam de sismo para sismo. Estes também vão variar com ou sem carga vertical e também em altura. Sendo esta uma estrutura assimétrica o CR não irá coincidir com o CM, tanto no eixo X como no eixo Y. Portanto considerando-se que existe um eixo fictício (X') que passa pelo CM e CR e o seu eixo perpendicular (Y'), obtendo-se o seguinte sistema de eixos ortogonais:

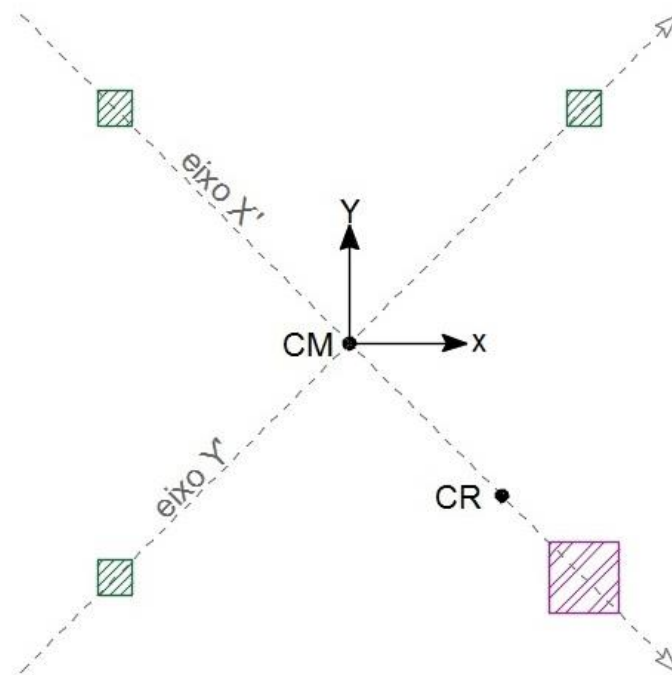


Fig. 5.34 - Eixos fictícios na estrutura assimétrica de 5 andares

Considerando então este sistema de eixos ortogonais fictícios observou-se que os deslocamentos absolutos dos pilares, que se encontram no eixo X' , têm tendência a ter maiores valores para ângulos críticos sobre o eixo X' , neste caso para o pilar de maior inércia como se pode observar na Fig. 5.35, e sobre o eixo Y' , para o pilar de menor como se pode observar na Fig. 5.36, ou seja, têm tendência a ter ângulos entre si perpendiculares. Já para os outros dois pilares o mesmo também tem tendência a acontecer, os ângulos críticos são praticamente perpendiculares entre si, em que o pilar que se encontra mais abaixo do eixo Y' tem ângulos muito próximos com a vertical (eixo Y) enquanto o outro pilar tem ângulos muito próximos com a horizontal (eixo X). Com isto dá a ideia que os ângulos são obtidos tendo em conta o maior efeito de torção que é possível causar na estrutura.

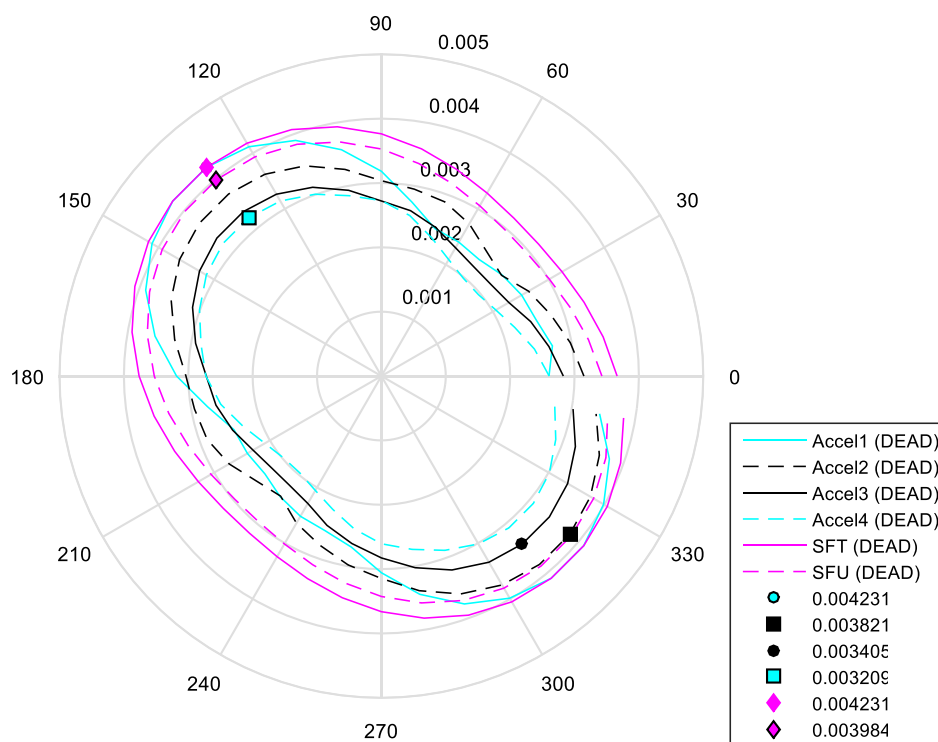


Fig. 5.35 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 6 (1º Andar) - 5 Andares iv)

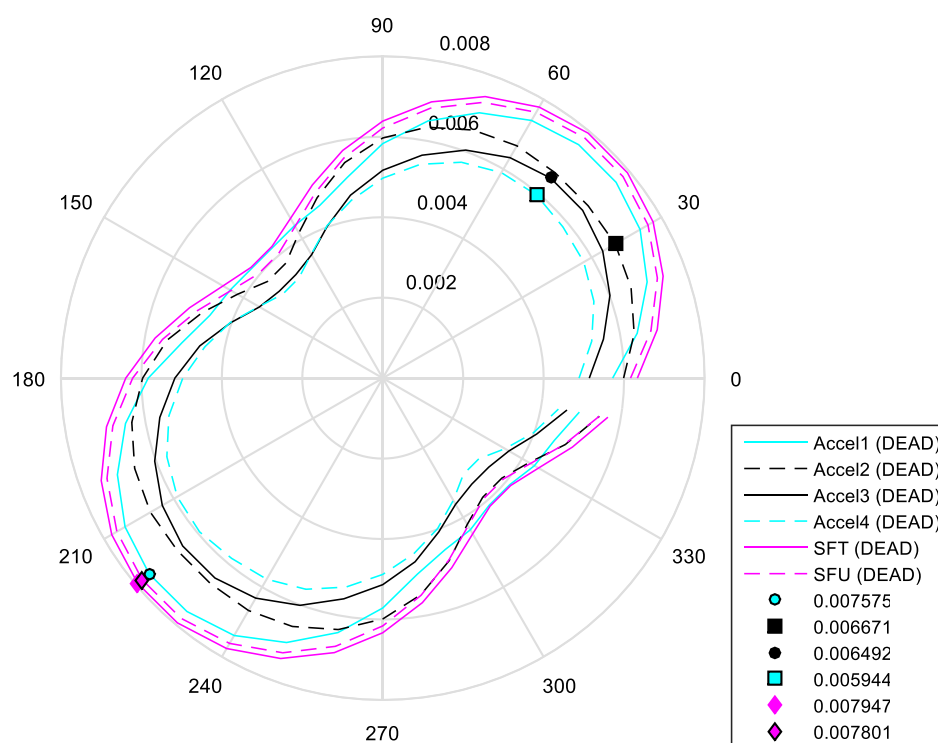


Fig. 5.36 - Deslocamento Absoluto (c/ carga vertical) - Nó 4 (1º Andar) - 5 Andares iv)

Os esforços nas vigas também têm ângulos críticos que vão variando de sismo para sismo. Entre a situação com ou sem carga vertical há poucas alterações dos ângulos críticos. Em altura os ângulos também

não variam muito, mantendo-se sempre dentro do mesmo intervalo que vai até 30° em relação ao eixo X ou Y, contudo há alguns casos que esta situação se alarga até aos 40° de intervalo, como mostra a Fig. 5.37.

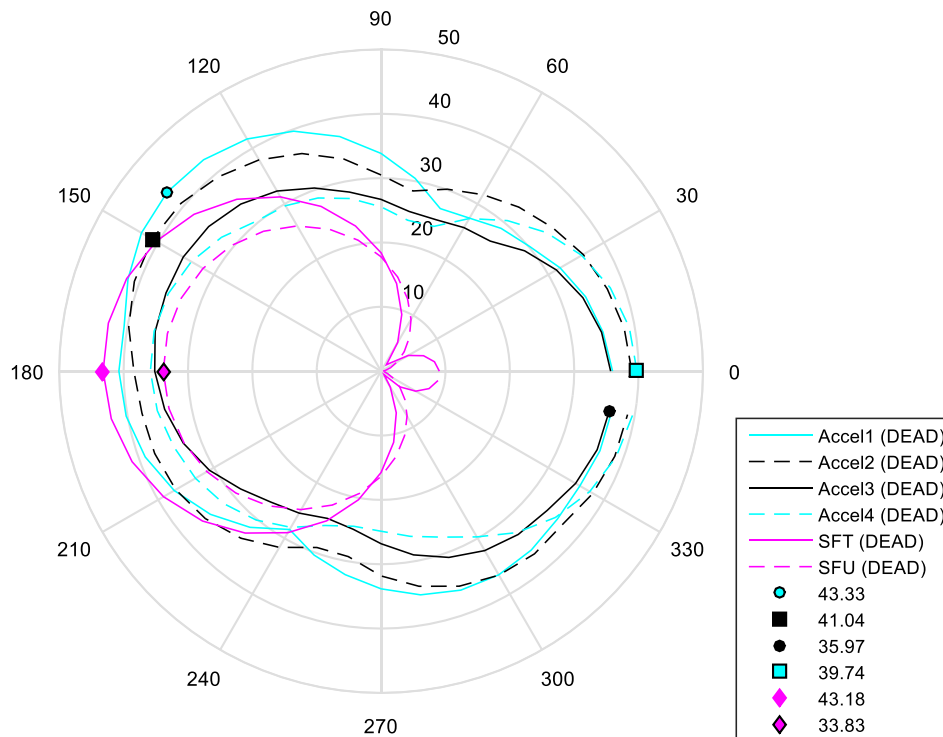
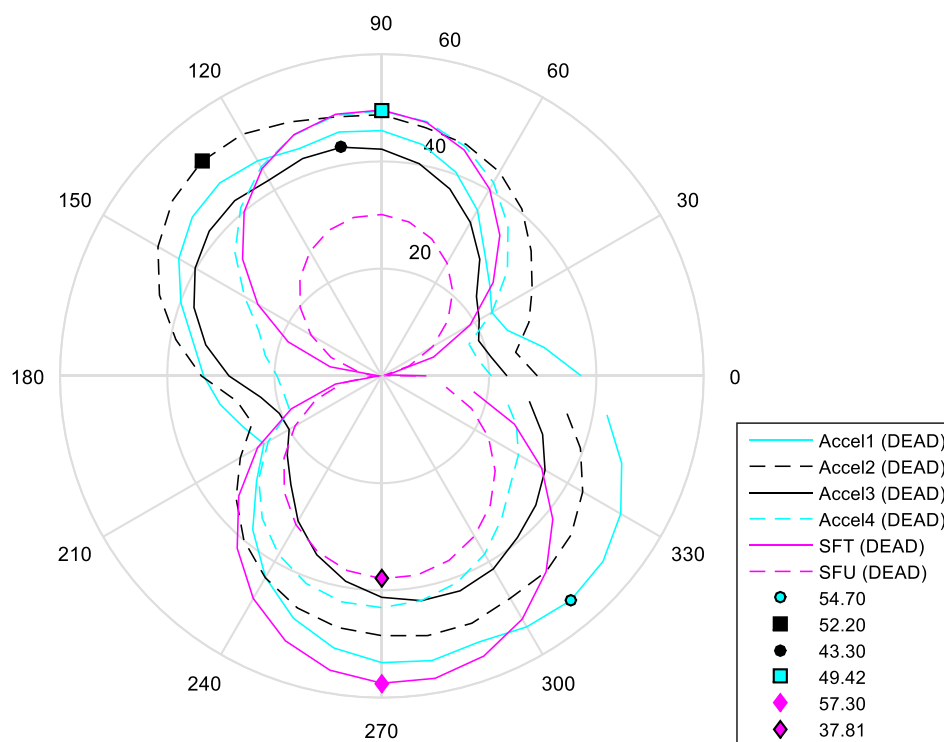
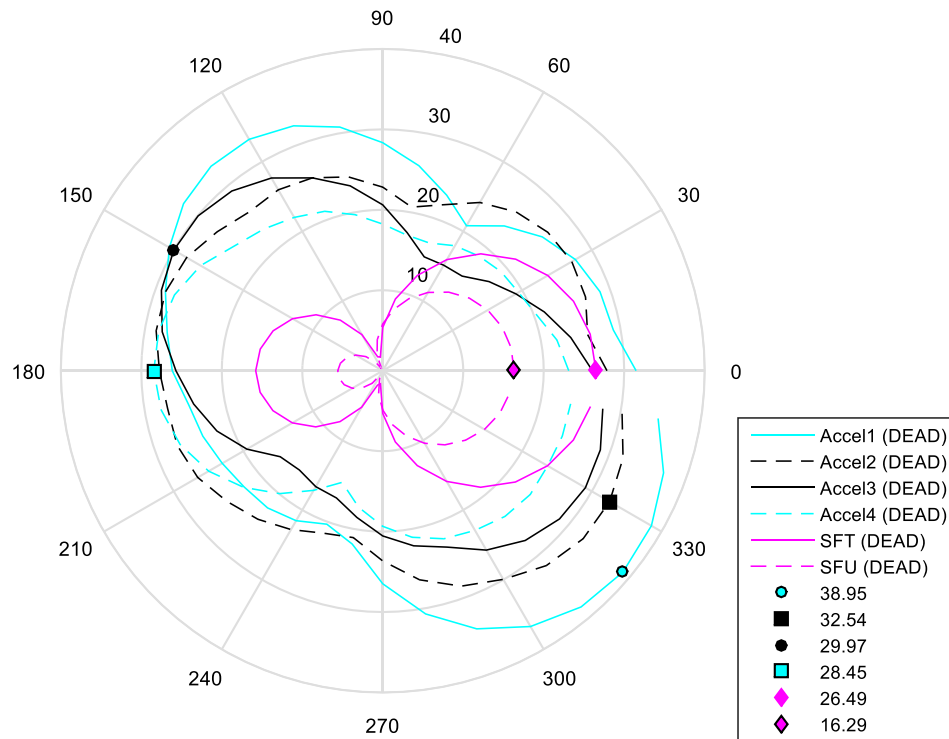


Fig. 5.37 - Força Viga Vx (c/ carga vertical) - Elemento 37 (5º Andar) - 5 Andares iv)

Os esforços nos pilares, nomeadamente Vx, têm ângulos críticos que variam de sismo para sismo, tal como em altura e quando é ou não aplicada carga vertical. Contudo esta variação de ângulos em todos os casos não é muito substancial, nunca fugindo de um intervalo de ângulos de 30° , como se pode ver na Fig. 5.38. Para Vy, os ângulos críticos vão também variar de sismo para sismo, em altura e quando é aplicada ou não carga vertical, tal como aconteceu em Vx, como se pode observar na Fig. 5.39. E tal como aconteceu em Vx, aqui os ângulos também não fogem de um certo intervalo de ângulos de 30° para todos os casos. Relativamente aos valores dos esforços reparou-se que para os pilares que estão sobre o eixo X' os valores de Vx e Vy são iguais, pois este é o eixo fictício em que a estrutura é simétrica.



Os ângulos críticos dos deslocamentos absolutos e dos esforços V_x e V_y estão relacionados. Para os pilares em que se encontram sobre o eixo X' o valor do ângulo nos deslocamentos absolutos é a média dos ângulos obtidos para os esforços V_x e V_y , como se pode observar nas Figs. 5.40, 5.41, 5.42, 5.43 e 5.44, que neste caso estão representados os deslocamentos absolutos no 4º andar onde está situado o pilar de maior inércia mais os respetivos esforços nos elementos ligados a esse ponto. Para os outros dois pilares os ângulos do deslocamento absoluto já tendem a ir para os ângulos do valor máximo entre V_x e V_y .

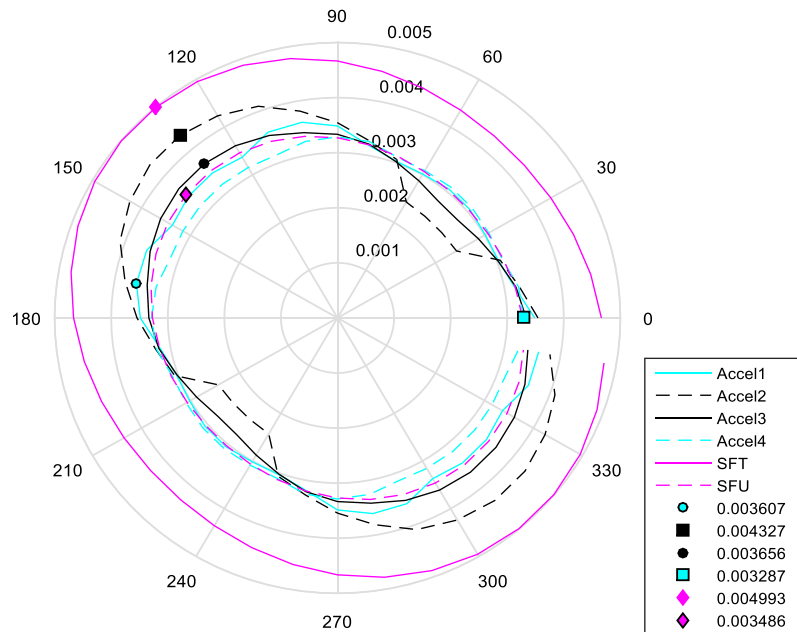


Fig. 5.40 - Deslocamento Absoluto (s/ carga vertical) - Nó 22 (4º Andar) - 5 Andares iv)

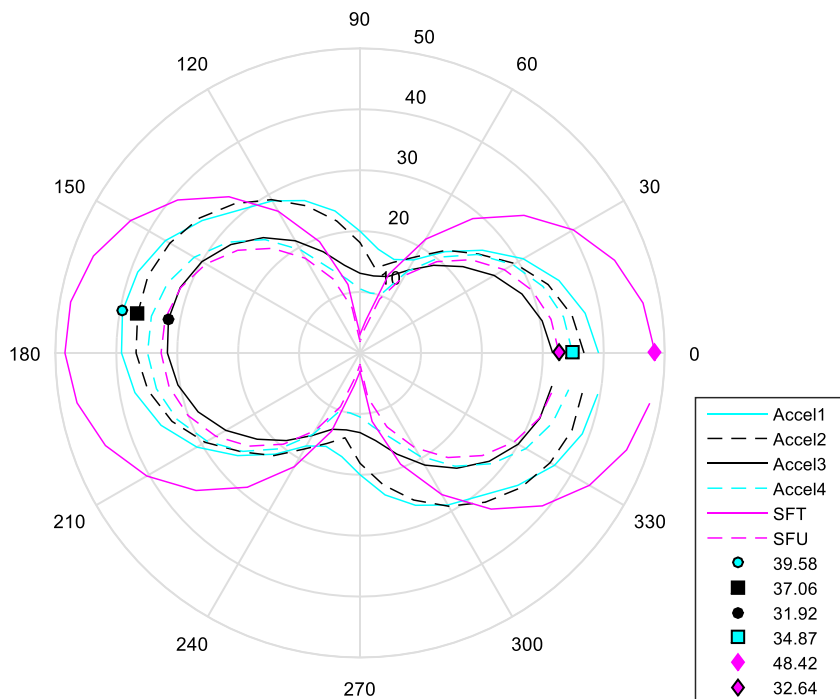
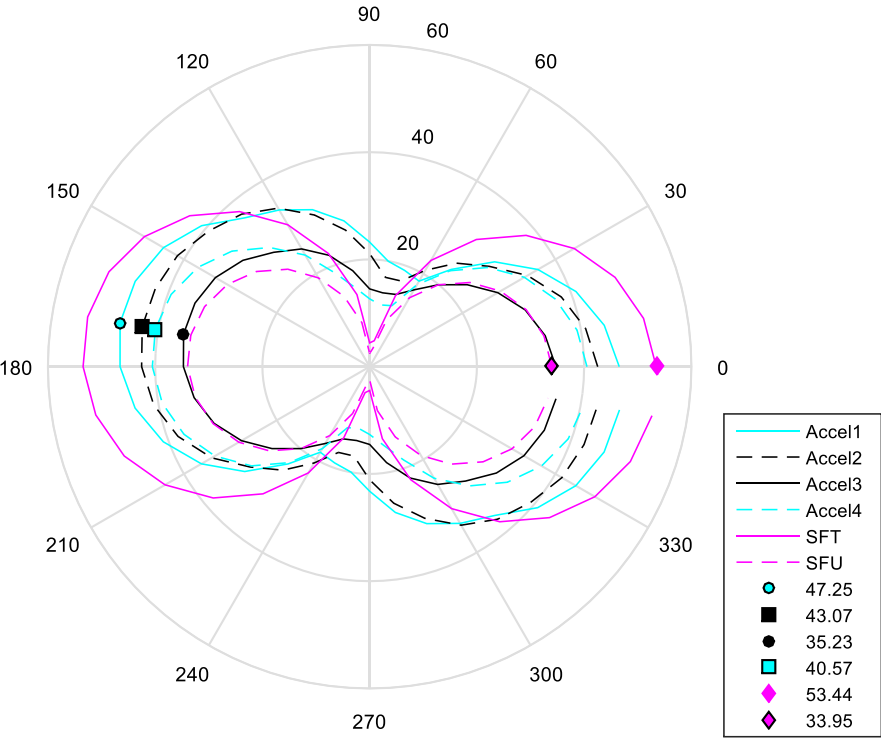
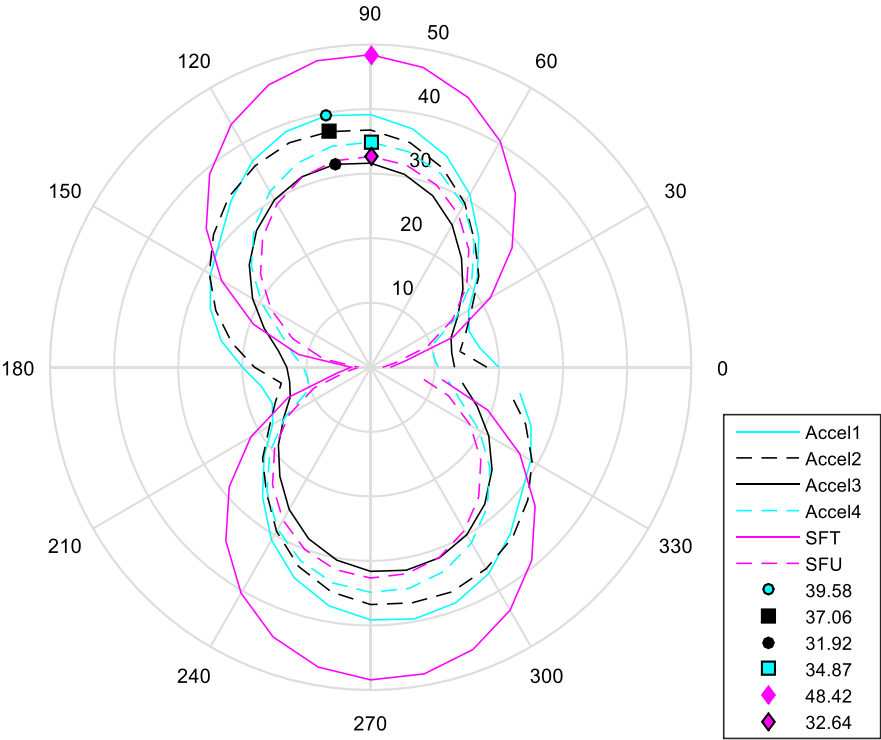


Fig. 5.41 - Força Viga V_x (s/ carga vertical) - Elemento 29 (4º Andar) - 5 Andares iv)



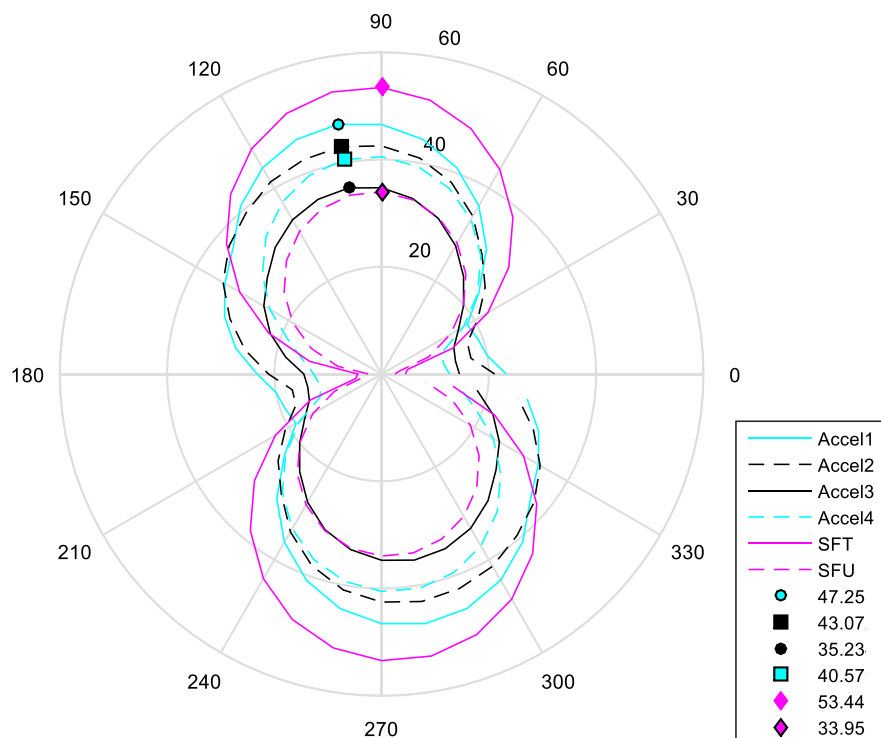


Fig. 5.44 - Força Pilar V_y (s/ carga vertical) - Elemento 27 (4º Andar) - 5 Andares iv)

Nas figuras apresentadas acima é visível que os esforços no pilar de maior inércia apresenta valores iguais para o ângulo de incidência V_x e V_y (Figs. 5.43 e 5.44, respetivamente), tal como as vigas que estão ligadas a este pilar apresentam ambas como esforço V_x (Figs. 5.41 e 5.42), mas em direções diferentes devido às suas disposições, valores iguais. Com valores iguais vai haver igual influência dos respetivos ângulos críticos no deslocamento da estrutura, levando a que os deslocamentos absolutos obtidos tenham ângulos críticos numa situação intermédia, tal como mostra a Fig. 5.40.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES

Na presente dissertação apresentaram-se várias tipologias de estruturas onde foram efetuados modelos num programa computacional SAP2000 e analisados os diferentes comportamentos que estas estruturas exibem, dando maior importância aos ângulos críticos de incidência da ação sísmica que originam os maiores valores de resposta de cada estrutura.

Com as análises feitas a essas estruturas foi possível obter as seguintes conclusões:

- As estruturas simétricas nas duas direções, com a mesma rigidez em ambas as direções, apresentam ângulos críticos coincidentes com os eixos ortogonais usuais, ou seja, estão sobre os eixos X e Y para qualquer tipo de sismo ou qualquer carga aplicada não vai haver alteração desses ângulos críticos ou mesmo que a estrutura tenha um ou mais andares, tudo isto para os deslocamentos absolutos e esforços nos elementos estruturais;
- As estruturas simétricas nas duas direções, com rigidez diferente para cada direção, apresentam ângulos críticos na direção de menor rigidez, sendo que estes ângulos se mantêm para qualquer tipo de sismo, quer tenha ou não carga vertical aplicada e quer seja uma estrutura de um ou mais andares;
- As estruturas simétricas numa direção apresentaram ângulos críticos aleatórios quando se faz o estudo sobre o eixo X, da qual a estrutura tem simetria, o que leva a que estes ângulos tenham um certo desvio relativamente ao eixo X. Neste caso os ângulos não são iguais para qualquer tipo de sismo, havendo um pequeno intervalo de 10° em que estes se situam, acontecendo o mesmo quando se aplica carga vertical. Em altura estes ângulos também vão variando, ou seja, para estruturas com a mesma tipologia de pilares mas com andares diferentes poderá haver uma certa diferença nos ângulos críticos da estrutura, nunca variando mais do que 10° de andar para andar, quando se trata da análise dos elementos da estrutura. Pode-se então considerar que quanto aos esforços nos elementos estruturais este tipo de estruturas tem um comportamento muito semelhante ao de estruturas simétricas nas duas direções. Contudo quanto aos deslocamentos absolutos os ângulos críticos vão depender muito da grandeza da resposta estrutural em cada direção;
- As estruturas assimétricas, que apesar de apresentarem ângulos críticos que não estão sobre os eixos ortogonais usuais da estrutura – X e Y –, estes têm tendência a estarem próximos ou mesmo sobre um sistema de eixos ortogonais fictícios – eixos que são compostos por um eixo que atravessa o CM e CR da estrutura, sendo este o eixo principal, e o outro eixo que fará 90°

em relação ao principal fictício. Esta situação verificou-se para qualquer tipo de sismo, para uma situação com ou sem carga vertical e em altura. Apesar destes ângulos apresentados não serem sempre constantes, eles apresentam um pequeno intervalo de aproximadamente 30°.

Com estas informações pode-se observar as estruturas mais regulares e simétricas, tanto em planta como em altura são as que apresentam comportamentos mais esperados. Porém também reparou-se que os ângulos críticos têm uma certa tendência a estarem sobre os eixos ortogonais usuais da estrutura – X e Y – para estruturas simétricas em pelo menos numa das direções ou a estarem sobre eixos fictícios obtidos a partir da localização do CM e CR da estrutura no caso de estruturas assimétricas.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tendo em conta a importância do estudo do tema da presente dissertação, é importante salientar que ainda há muitas incertezas nesta matéria, muito devido à grande complexidade que os sismos apresentam e do comportamento estrutural face a este.

Com isto seria de extrema importância realizar mais testes e pesquisas relacionados com o tema da presente dissertação. Para tal seria importante confirmar agora para estruturas assimétricas e irregulares de várias tipologias diferentes se de facto os ângulos críticos do qual se obtêm as respostas máximas estão relacionadas com os eixos fictícios que são obtidos a partir do CM e CR, tal como se observou no exemplo da estrutura assimétrica desta dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Charleson, A. *Seismic Design For Architects*, Elsevier, Oxford, 2008
- [2] Wilson, E. *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures*, Computers and Structures, Inc., Berkeley, 1995
- [3] Arêde, A. *Dinâmica de Estruturas e Engenharia Sísmica*, Sebenta FEUP – DEC – Estruturas, Porto, 2013
- [4] *Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos*, 2010
- [5] Anastassiadis, K. (1993). Directions sismiques défavorables et combinaisons défavorables des efforts. *Ann I T B T P*, 512, 83-99.
- [6] Anastassiadis, K., Avramidis, I., Panetsos, P. (2002). Concurrent design forces in structures under three-component orthotropic seismic excitation. *Earthq Spectra*, 18, 1-17.
- [7] Athanatopoulou, A. (2005). Critical Orientation of Three Correlated Seismic Components. *Engineering Structures*, 27(2), 301-312.
- [8] Cantagallo, C., Camata, G., Spacone, E. (2012). The effect of the earthquake incidence angle on seismic demand of reinforced concrete structures. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 24-28.
- [9] Fontara, I., Kostinakis, K., Athanatopoulou, A. (2012). Some issues related to the inelastic response of buildings under Bi-directional excitation. *Proceedings of 15th world conference on earthquake engineering*, Lisbon, 3715.
- [10] Hosseini, M., Salemi, A. (2008). Studying the Effect of Earthquake Excitation Angle on the Internal Forces of Steel Building's Elements by Using Nonlinear Time History Analyses. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing.
- [11] López, O., Torres, R. (1997). The Critical Angle of Seismic incidence and the Maximum Structural Response. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26(9), 881-894.
- [12] López, O., Chapra, A., Hernandez, J. (2000). Critical response of structures to multicomponent earthquake excitation. *Earthq Eng Struct Dyn*, 29, 1759-1778.
- [13] Magliulo, G., Maddaloni, G., Petrone, C. (2014). Influence of Earthquake Direction on the Seismic response of Irregular Plan RC Frame Buildings. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(2), 243-256.
- [14] Marinilli, A., Lopez, O. (2008). Evaluation of critical responses and critical incidence angles obtained with RSA and RHA. *Proceedings of the 14WCEE*, Beijing.
- [15] Menun, C., Der Kiureghian, A. (1998). A replacement for the 30%, 40% and SRSS rules for multicomponent seismic analysis. *Earthq Spectra*, 14(1), 153-163.
- [16] Menun, C., Der Kiureghian, A. (2000). Envelopes for seismic response vectors. *I: teory. J Struct Eng*, 126, 467-481.
- [17] Penzien, J., Watabe, M. (1975). Characteristics of 3D earthquake ground motions. *Earthq Eng Struct Dyn*, 3, 365-373.
- [18] Quadri, S., Madhurin, M. (2014). Investigation of Critical Angle of Seismic Incidence for the Analysis of RCC Frames. *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*, 2(3).

- [19] Smeby, W., Der Kiureghian, A. (1985). Modal combination rules for multicomponent earthquake excitation. *Earthq Eng Struct Dyn*, 13, 1-12.
- [20] Tsourekas, A., Athanatopoulou, A., Avramidis, I. (2009). Effects of seismic incident angle on response of structures under bi-directional recorded and artificial ground motion. *ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN)*, Rhodes.
- [21] Wilson, E., Button, M. (1982). Three-dimensional dynamic analysis for multicomponent earthquake spectra. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 10, 471-476.
- [22] Wilson, E., Suharwardy, Y., Habibullah, A. (1995). A clarification of the orthogonal effects in a three-dimensional seismic analysis. *Earthquake Spectra*, 11, 659-666.

ANEXOS

ANEXO A – TABELAS DAS FORÇAS ESTÁTICAS PARA OS 3 PRIMEIROS MODOS DE VIBRAÇÃO

Análise Estática Linear - 1 Andar ii)							
Modo	Direção	T (s)	w (rad/s)	w ² (rad ² /s ²)	Se (m/s ²)	Fb (kN)	Fi (kN)
1	UY	0,105013	59,832	3579,922	5,738	85,62	85,62
2	UX	0,064649	97,189	9445,743	5,738	85,62	85,62

Análise Estática Linear - 1 Andar ii)							
Modo	Direção	T (s)	w (rad/s)	w ² (rad ² /s ²)	Se (m/s ²)	Fb (kN)	Fi (kN)
1	UY	0,105013	59,832	3579,922	5,738	85,62	85,62
2	UX	0,064649	97,189	9445,743	5,738	85,62	85,62

Análise Estática Linear - 1 Andar iii)							
Modo	Direção	T (s)	w (rad/s)	w ² (rad ² /s ²)	Se (m/s ²)	Fb (kN)	Fi (kN)
1	UY	0,120977	51,937	2697,454	5,738	85,62	85,62
2	UX	0,086282	72,822	5302,972	5,738	85,62	85,62

Análise Estática Linear - 1 Andar iv)							
Modo	Direção	T (s)	w (rad/s)	w ² (rad ² /s ²)	Se (m/s ²)	Fb (kN)	Fi (kN)
1	UX = UY	0,113277	55,467	3076,637	5,738	85,62	85,62
2	UX = UY	0,088819	70,741	5004,353	5,738	85,62	85,62

Análise Estática Linear - 5 Andares i)											
Modo	Direção	T (s)	w (rad/s)	w ² (rad ² /s ²)	Se (m/s ²)	Fb (kN)	F1 (kN)	F2 (kN)	F3 (kN)	F4 (kN)	F5 (kN)
1	UX	0,56022	11,216	125,789	2,560	191,05	12,74	25,47	38,21	50,95	63,68
2	UY	0,56022	11,216	125,789	2,560	191,05	12,74	25,47	38,21	50,95	63,68

Análise Estática Linear - 5 Andares ii)											
Modo	Direção	T (s)	w (rad/s)	w ² (rad ² /s ²)	Se (m/s ²)	Fb (kN)	F1 (kN)	F2 (kN)	F3 (kN)	F4 (kN)	F5 (kN)
1	UY	0,45206	13,899	193,186	3,173	236,76	15,78	31,57	47,35	63,14	78,92
2	UX	0,34154	18,397	338,442	4,200	313,38	20,89	41,78	62,68	83,57	104,46

Análise Estática Linear - 5 Andares iii)											
Modo	Direção	T (s)	w (rad/s)	w ² (rad ² /s ²)	Se (m/s ²)	Fb (kN)	F1 (kN)	F2 (kN)	F3 (kN)	F4 (kN)	F5 (kN)
1	UY	0,50229	12,509	156,480	2,856	213,09	14,21	28,41	42,62	56,82	71,03
2	UX	0,42494	14,786	218,631	3,376	251,87	16,79	33,58	50,37	67,17	83,96

Análise Estática Linear - 5 Andares iv)											
Modo	Dire- ção	T (s)	w (rad/s)	w ² (rad ² /s ²)	S _e (m/s ²)	F _b (kN)	F ₁ (kN)	F ₂ (kN)	F ₃ (kN)	F ₄ (kN)	F ₅ (kN)
1	UX = UY	0,48204	13,035	169,904	2,976	222,04	14,80	29,60	44,41	59,21	74,01
2	UX = UY	0,44886	13,998	195,948	3,196	238,45	15,90	31,79	47,69	63,59	79,48